

This material contains information affecting the National Defense of the United States within the meaning of the Espionage Laws, Title 18, U.S.C. Secs. 793 and 794, the transmission or revelation of which in any manner to an unauthorized person is prohibited by law.

~~C-O-N-F-I-D-E-N-T-I-A-L~~

COUNTRY USSR

REPORT

SUBJECT Soviet Technical Publications

DATE DISTR. 12 November 1958

NO. PAGES 1

REFERENCES

DATE OF INFO.

**PLACE &
DATE ACQ.**

25X1

SOURCE EVALUATIONS ARE DEFINITIVE. APPRAISAL OF CONTENT IS TENTATIVE.

25X1

Russian-language technical publications

1. Izvestiya Leningradskogo Elektrotekhnicheskogo Instituta imeni V.I. Ulyanova (Lenina) (Herald of the Leningrad Electro-Technical Institute i/n V.I. Ulyanov (Lenin)) - Issues No. 34, 35, 36, for the year 1958. Issue 36 contains articles on various aspects of electronics.
2. Geograficheskiy Sbornik, X - Geomorfologiya i Paleogeografiya (A Geographic Collection, Volume X, Geomorphology and Paleogeography), 192 pages, published by the Academy of Sciences, USSR, Moscow and Leningrad, 1958.

When separated from the covering report, the attachments may be considered as UNCLASSIFIED.

25X1

ENCLOSURE NOT RECORDED

C-O-N-F-I-D-E-N-T-I-A-L

STATE	X	ARMY	X	NAVY	X	AIR	X	FBI		AEC									
(Note: Washington distribution indicated by "X"; Field distribution by "#".)																			

INFORMATION REPORT FOR ENVIRONMENTAL REPORT

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени В. И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

ИЗВЕСТИЯ
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА
имени В. И. УЛЬЯНОВА
(ЛЕНИНА)
ВЫПУСК XXXVI

ЛЕНИНГРАД
1958

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени В. И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

ИЗВЕСТИЯ
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА
имени В. И. УЛЬЯНОВА
(ЛЕНИНА)

ВЫПУСК XXXVI

(год издания 56-й)

ВОПРОСЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ЛЕНИНГРАД
1958

STAT

Page Denied

Доктор техн. наук проф. К. И. КРЫЛОВ

О НЕКОТОРЫХ НОВЫХ МЕТОДАХ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

§ 1. Введение

Проблема генерирования электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов значительной мощности является одной из основных и наиболее важных проблем современной радиоэлектроники, решение ее имеет весьма большое как практическое, так и научное значение. Однако обычные методы генерирования электромагнитных волн сверхвысокой частоты при помощи маячковых ламп, клистронов, магнетронов и ламп с бегущей обратной электромагнитной волной встречают все большие и большие затруднения по мере укорочения длины волны, и для генерирования электромагнитных волн короче одного миллиметра эти методы оказываются неприемлемыми.

Трудности применения вышеуказанных методов для генерирования радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов вытекают из того, что во всех перечисленных типах генераторных ламп используется взаимодействие электронного потока с полем зарядов резонирующей или замедляющей системы. Это взаимодействие приводит к группированию электронного потока в сгустки, которые передают свою энергию резонирующей или замедляющей системе. Затем электроны резонирующей системы, придя в колебательное движение, отдают энергию в виде энергии высокочастотного поля.

При уменьшении длины волны уменьшается объем резонирующей системы, вместе с тем уменьшается и энергия, запасенная в резонаторе, а следовательно, и отдаваемая резонатором мощность электромагнитных колебаний.

При длине волны в несколько миллиметров геометрические размеры резонатора оказываются равными также всего нескольким миллиметрам. В качестве примера на рис. 1 приведен разрез недавно разработанного [1] мощного генераторного клистрона на 12 *вт* и длину волны 8 *мм*. На рис. 2 и 3 изображены в соответствующем масштабе его резонирующая система (рис. 2) и электронная

пучка (рис. 3). Зазор резонатора данного клистрона равняется всего 0,25 мм. Диаметр трубки пролета 0,58 мм. Длина пролета 2,64 мм. Отверстие в блоке резонатора имеет диаметр 0,6 мм.

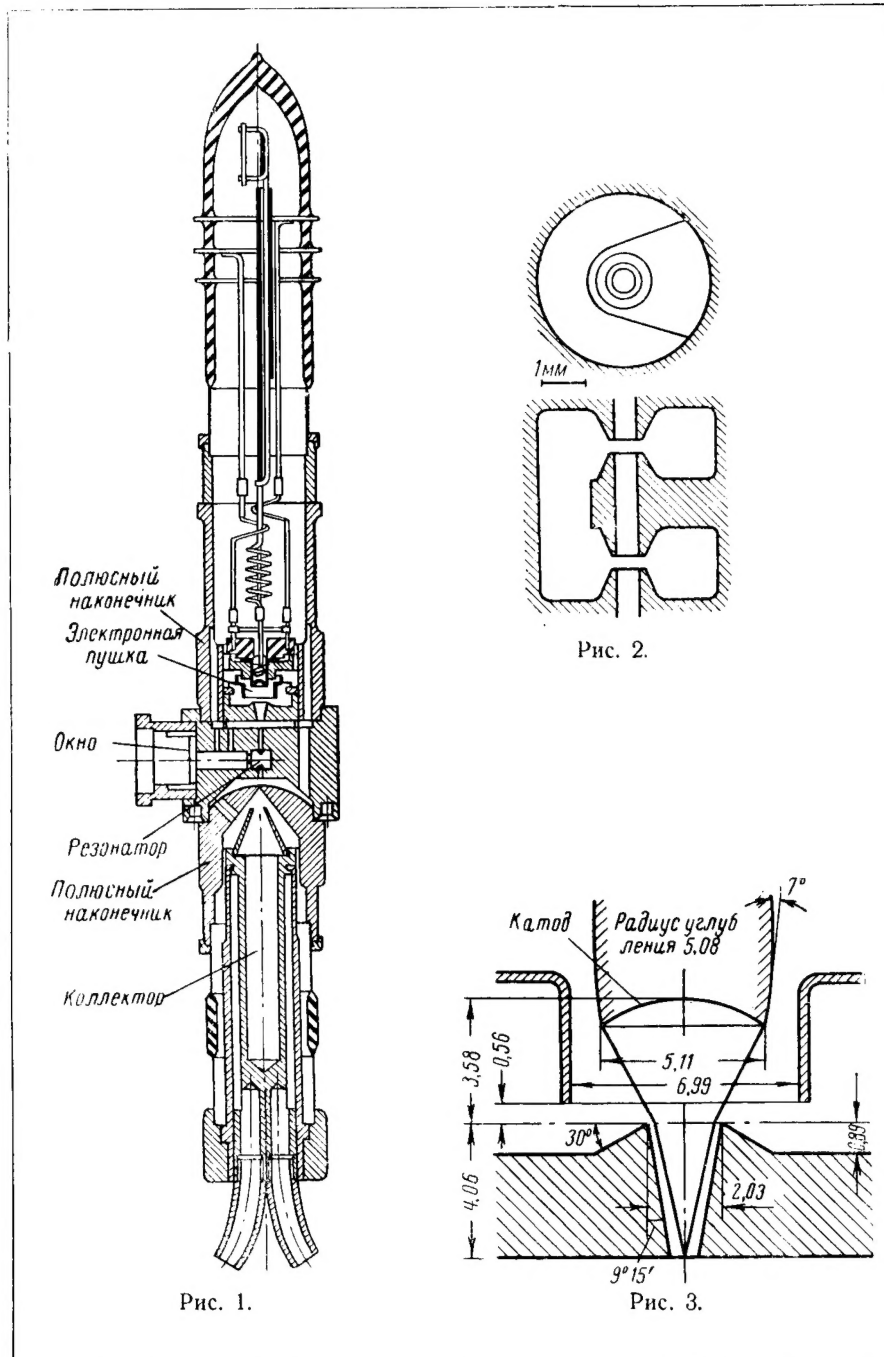
Другим примером может служить приведенная на рис. 1 схема ЛБВ миллиметрового диапазона и ее геометрические размеры [2]. Эта лампа генерировала в диапазоне 5—7 мм. Полезная ее мощность достигала 1 мвт. Диаметр электронного пучка в ней был 0,75 мм. Замедляющая система была создана петлями, находящимися в волноводе. Нормальный волновод для приведенного диапазона имеет внутренние габариты $4,8 \times 2,4$ мм. Высота волновода, создающего структуру, была 1,2 мм. Петли были сделаны из золоченой молибденовой проволоки диаметром 0,05 мм. На один миллиметр приходилось 8 петель.

Таковы геометрические размеры резонирующих и замедляющих систем электронных ламп длинноволнового миллиметрового диапазона. При переходе же к коротковолновому миллиметровому диапазону эти размеры должны быть еще значительно уменьшены. При изготовлении резонаторов и замедляющих систем таких размеров возникают значительные трудности. Механические работы при этом должны быть произведены с большой степенью точности. Допуски при изготовлении такого рода систем определяются всего лишь несколькими микронами. Так, например, при изготовлении клистрона, описанного в статье [1], длина зазора резонатора должна была быть выполнена с точностью до 0,005 мм.

Добротность резонаторов при уменьшении их размеров, т. е. при укорочении длины волны, значительно ухудшается.

С уменьшением длины волны уменьшается также объем пучка электронов, взаимодействующего с полем резонирующей системы. Это происходит не только потому, что уменьшаются геометрические размеры пучка, но также и потому, что поле резонирующей системы, взаимодействующее с пучком, уменьшается с расстоянием по экспоненциальному закону, причем показатель степени у экспоненты пропорционален частоте колебаний. Таким образом, при укорочении длины волны значительно уменьшается объем, в котором происходит взаимодействие электронного пучка с полем резонатора. Вместе с тем практически осуществить взаимодействие оказывается возможным только с большим трудом, и при этом значительная часть электронов попадает на замедляющую систему. Кроме того, с уменьшением длины волны возникает значительное затруднение в осуществлении обратной связи, обеспечивающей процесс группирования электронного потока.

Перечисленными выше не исчерпываются все затруднения, возникающие при генерировании электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов обычными способами, вместе с тем из изложенного становится ясным, почему классические методы оказываются неприемлемыми для решения поставленной



задачи. В связи с этим в последнее время возникла мысль о получении электромагнитных волн указанных выше диапазонов без резонирующих систем — непосредственно от движущихся элек-

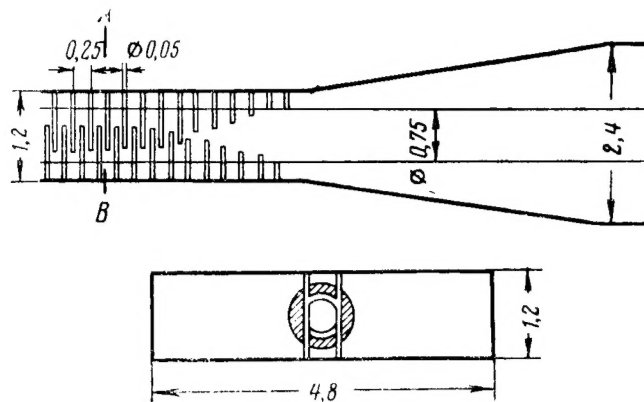


Рис. 4.

тронов. При этом наметились два пути получения излучения: от ускоренно движущихся зарядов и от зарядов, движущихся равномерно со сверхсветовой скоростью. Настоящая статья посвящается обзору работ, проведенных в данном направлении. Перейдем к краткому изложению указанных методов.

§ 2. Излучение ускоренно движущегося электрона

Расчет электромагнитного поля произвольно движущегося электрического заряда, произведенный на основании классической электродинамики, приводит к заключению [3, 4], что каждое из полей: электрическое \vec{E} и магнитное \vec{H} , может быть представлено в виде суммы двух полей \vec{E}_1 , \vec{E}_2 и \vec{H}_1 , \vec{H}_2 , где

$$\vec{E}_1 = \frac{e}{\left(R - \frac{\vec{R} \cdot \vec{v}}{c}\right)^3} \left(\vec{R} - \vec{v} \frac{R}{c} \right) \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right), \quad (1)$$

$$\vec{H}_1 = - \frac{e}{\left(R - \frac{\vec{R} \cdot \vec{v}}{c}\right)^3} \left[\left(\vec{R} - \vec{v} \frac{R}{c} \right) \frac{\vec{v}}{c} \right] \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = \left[\frac{\vec{v}}{c} \vec{E} \right], \quad (2)$$

$$\vec{E}_2 = -\frac{eR}{c^2} \frac{\vec{v}}{\left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^2} + \frac{eR(\vec{R}\vec{v})}{c^2 \left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^3} \left(\frac{\vec{R}}{R} - \frac{\vec{v}}{c}\right), \quad (3)$$

$$\vec{H}_2 = -\frac{e[\vec{R}\vec{v}]}{c^2 \left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^2} + \frac{e[\vec{v}\vec{R}]}{c \left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^3} \frac{(\vec{R}\vec{v})}{c^2} = \left[\frac{\vec{R}}{R} \vec{E}_2\right]. \quad (4)$$

где

e -- величина электрического заряда;
 R -- расстояние от заряда до точки, где определяется поле;
 \vec{v} -- скорость движущегося заряда;
 \vec{v} -- его ускорение;
 c -- скорость света.

Поле \vec{E}_1 и \vec{H}_1 представляет собой не что иное, как поле равномерно и прямолинейно движущегося заряда со скоростью \vec{v} . Оно убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от заряда и при $v = 0$ обращается в статическое поле

$$\vec{E}_1 = \frac{e\vec{R}}{R} \quad \text{и} \quad \vec{H}_1 = 0. \quad (5)$$

($v = 0$) ($v = 0$)

Это поле, как бы движущееся вместе с зарядом, может быть названо полем „квазистатическим“.

Вторая часть электромагнитного поля, описываемая уравнениями (5) и (6), зависит от ускорения заряда \vec{v} . Оно существенно отличается от поля \vec{E}_1 и \vec{H}_1 , убывает обратно пропорционально первой степени расстояния от заряда и представляет собою электромагнитную волну, испускаемую движущимся с ускорением зарядом. Это поле обращается в ноль, если

$$\vec{v} = 0. \quad (6)$$

На далеком расстоянии от заряда поле \vec{E}_2 , \vec{H}_2 (волновое поле) преобладает над полем \vec{E}_1 , \vec{H}_1 (квазистатическим).

Таким образом, при всяком ускоренном движении электрический заряд испускает электромагнитную волну, энергия которой определяется потоком вектора Умова—Пойнтинга

$$S = \frac{c}{4\pi} [\vec{E}\vec{H}] = \frac{c}{4\pi} \vec{E}_2^2 \frac{\vec{R}}{R} \quad (7)$$

и зависит в первую очередь от ускорения заряда.

Поле \vec{E}_1, \vec{H}_1 мы в дальнейшем интересоваться не будем.

Полная энергия, излучаемая в единицу времени (интенсивность излучения) ускоренно движущимся зарядом, находится путем интегрирования по замкнутой поверхности уравнения (7) и оказывается равной

$$\frac{dW}{d\tau} = \frac{2e^2 \left(\vec{v}^2 - \frac{[\vec{v}\vec{v}]^2}{c^2} \right)}{3c^3 (1 - \beta^2)^3}, \quad (8)$$

где $\beta = \frac{v}{c}$.

Заметим, что интенсивность излучения, помимо ускорения, зависит еще от энергии и величины движущегося заряда.

Из предыдущих формул можно вывести некоторые следствия для углового распределения излучения, т. е. определить диаграмму направленности.

Для малых скоростей интенсивность излучения, приходящаяся на единицу телесного угла —

$$\frac{dJ}{d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi c^3} \vec{v}^2 \sin^2 \Theta, \quad (9)$$

где Θ — угол между мгновенным ускорением и направлением излучения.

Таким образом, при малых скоростях ($v \ll c$) излучение имеет максимум в плоскости, перпендикулярной мгновенному ускорению.

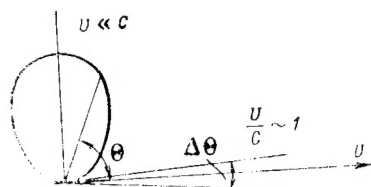


Рис. 5.

При увеличении скорости заряда происходит изменение диаграммы направленности (рис. 5) и при релятивистских скоростях, когда $\frac{v}{c} \approx 1$, излучение направлено почти параллельно мгновенной скорости заряда и сосредоточено в узком интервале углов

$$\Delta\Theta \approx \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (10)$$

Что касается спектра излучения, то здесь следует различать периодическое движение заряда и непериодическое. В случае периодического движения излучается дискретный спектр, в случае

непериодического движения, как, например, при столкновении заряженных частиц, излучается сплошной спектр.

Рассмотрим некоторые частные случаи излучения при неравномерном движении электрических зарядов.

Излучение при торможении электрических зарядов

Торможение электрона не является периодическим процессом и поэтому излученный при торможении импульс эквивалентен излучению непрерывного спектра.

Рассматривая в первом приближении процесс торможения, как движение электрона с постоянным отрицательным ускорением, действующим в течение малого промежутка времени, можно выражение для импульса представить в виде интеграла Фурье и найти распределение энергии в спектре. При этом оказывается, что интенсивность излучения J_λ , соответствующая длине волны λ , будет равняться

$$J_\lambda = k \sin^2 \left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \right), \quad (11)$$

где

k — коэффициент пропорциональности;
 δ — ширина электромагнитного импульса.

Из формулы (11) видно, что интенсивность излучения принимает максимальное значение при $\lambda = \lambda_m = 2\delta$ и, кроме того, при длинах волн $\lambda_1 = \frac{\lambda_m}{3}$, $\lambda_2 = \frac{\lambda_m}{5}$, $\lambda_3 = \frac{\lambda_m}{7}$ и т. д.

На рис. 6 представлена зависимость $J_\lambda = f(\lambda)$, из которой видно, что значительная часть всей излучаемой энергии приходится на интервал длин волн вблизи $\lambda = \lambda_m = 2\delta$.

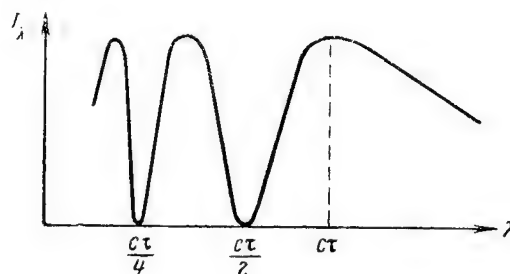


Рис. 6.

Так как ширина импульса зависит от времени торможения, то и длина волны, на которую приходится максимальная интенсивность излучения, определяется временем торможения электрона.

Таким образом, можно создавать такие физические условия, при которых время торможения будет соответствовать излучению

электромагнитного импульса, в котором максимум интенсивности излучения придется на миллиметровый или субмиллиметровый диапазон.

На такого рода возможность генерирования электромагнитных волн миллиметрового диапазона автором настоящей статьи было указано еще в 1936 г. [5]. В свое время в этом направлении в ЛЭТИ были проведены также и первые экспериментальные работы [5, 6]. В 1947 г. были опубликованы работы Гинзбурга и Франка [7], затем позднее Аскарьяна [8, 9].

Каково же общее количество энергии, излучаемой электроном при торможении?

Из формулы (8) путем интегрирования можно найти, что общая излученная электроном энергия при потере его скорости от v до 0, т. е. до полной его остановки, равняется

$$W = \frac{2v^2 e^2}{3c^3 (1 - \beta^2)^{3/2} \tau}, \quad (12)$$

где τ — время торможения электрона.

При $v \ll c$ (нерелятивистский случай)

$$W = \frac{2v^2 e^2}{3c^3 \tau}. \quad (13)$$

Таким образом, общая энергия излучения существенно зависит от первоначальной энергии электронов и времени торможения.

Из формулы (12) следует, что так как время торможения τ определяет длину излучаемой волны λ_m , и, таким образом, при поставленной задаче генерирования миллиметровых или субмиллиметровых волн должно быть задано, то для получения возможно большей энергии излучения необходимо оперировать с электронами больших скоростей.

Диаграмма направленности излучения при малых скоростях электронов будет иметь вид, соответствующий формуле (9); при больших скоростях будет наблюдаться изменение диаграммы, и при $v \rightarrow c$ излучение почти параллельно скорости заряда и будет сосредоточено в конусе с углом $\Delta\theta$, определяемым формулой (10).

Излучение электрических зарядов, движущихся равномерно по окружности

Как известно, заряд, влетающий в однородное постоянное магнитное поле перпендикулярно силовым магнитным линиям, движется по окружности, плоскость которой расположена перпендикулярно магнитным силовым линиям. Поскольку движение по окружности происходит с ускорением, направленным по радиусу к центру окружности, заряд должен излучать электромагнитную

волну. Принимая во внимание, что в этом случае $\vec{v} \perp \vec{v}$, из (8) следует, что интенсивность излучения оказывается равной

$$J = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \frac{v^4}{a^2 (1 - \beta^2)^2}, \quad (14)$$

где a — радиус орбиты, по которой движется заряд в магнитном поле.

Угловое распределение интенсивности имеет место в соответствии с ранее изложенным, т. е. при малых скоростях максимум излучения лежит в направлении, перпендикулярном к плоскости вращения заряда, при больших скоростях, когда $\beta = \frac{v}{c} \simeq 1$, максимум излучения сосредотачивается вблизи плоскости орбиты, причем угол, в котором практически сосредоточено излучение, имеет величину порядка

$$\Delta\theta \sim \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (15)$$

Спектральное распределение излучения значительно зависит от того, какова начальная скорость электрона.

В случае малых скоростей $v \ll c$ заряд при движении по окружности излучает в основном длину волны

$$\lambda = 2\pi a \frac{c}{v}, \quad (16)$$

т. е. длина излучаемой волны значительно превосходит размеры орбиты.

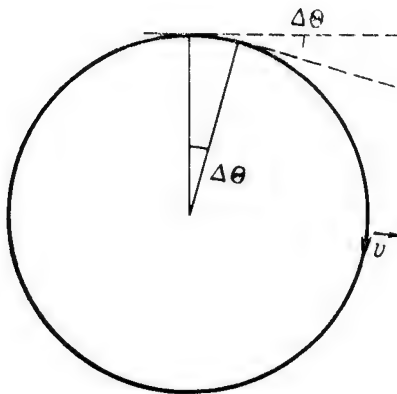


Рис. 7.

При переходе к большим скоростям излучение сосредотачивается в конусе с небольшим телесным углом, причем ось конуса совпадает с направлением излучения. При вращении электрона по

окружности наблюдатель воспринимает излучение в течение короткого отрезка времени, пока электрон проходит по окружности небольшой путь, соответствующий углу $\Delta\Theta$ (рис. 7). Так как при этом источник излучения движется с большой скоростью по направлению к наблюдателю, то имеет место эффект Доплера, и частота излучения заряда, движущегося по окружности, для неподвижного наблюдателя возрастает и оказывается равной

$$\omega = \frac{\omega_0}{1 - \beta \cos \Theta}, \quad (17)$$

где Θ — угол между скоростью \vec{v} и линией, соединяющей в данный момент источник с наблюдателем.

Принимая во внимание также, что благодаря релятивистской направленности вперед наблюдатель будет воспринимать кратковременный импульс, можно показать [10, 11, 12], что при больших скоростях зарядов максимум интенсивности приходится не на основную частоту, а на высокие обертоны. При этом имеется критическая частота ω_k , на которую приходится максимум излучения. Длина волны, излучаемая с наибольшей интенсивностью, значительно короче длины волны, соответствующей основному тону.

$$\omega_{kp} \propto \omega_0 (1 - \beta^2)^{-1/2}. \quad (18)$$

Например, при полной энергии электронов в 5 мэв максимум интенсивности приходится на 1000-ый обертон.

Излучение электрических зарядов, движущихся в пространственно периодическом стационарном магнитном или электрическом поле

Если электрон будет проходить через пространственно периодическое постоянное во времени магнитное или электрическое поле, то он будет описывать периодическую орбиту, т. е. двигаться с ускорением и, следовательно, он будет излучать электромагнитную волну [13]. Представим себе, например, устройство, изображенное на рис. 8.

Предполагая, что пространственное распределение поля описывается синусоидой, можно показать, что при сравнительно небольших полях и несильном малых скоростях траектория электрона будет весьма близка к синусоиде, расположенной в плоскости XY (рис. 9). Расчет интенсивности излучения в этом случае [14, 15, 16] приводит к заключению, что общее количество излученной энергии на пути L определяется по следующей формуле

$$\Delta W = \frac{1}{3} \left(\frac{e^2}{m_0 c^3} \right)^2 \beta L B_0^2 \left(\frac{e}{m_0 c^2} \right)^2. \quad (19)$$

При $\beta \rightarrow 1$ излучение опять сосредоточено в углах вокруг v

$$\Delta\theta = \sqrt{1 - \beta^2}$$

и максимум излучения приходится на частоту

$$\omega_{kp} = \frac{eB}{m_0c} \frac{1}{1 - \beta^2} \quad (20)$$

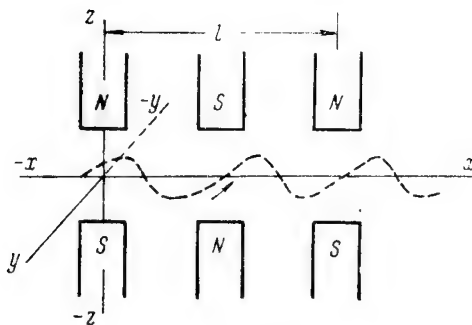


Рис. 8.

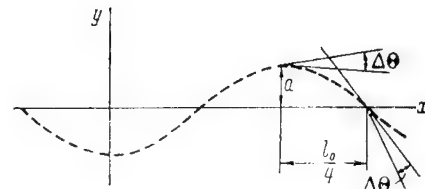


Рис. 9.

В случае электрического поперечного поля формулы остаются в основном теми же, однако в них следует заменить \vec{B} на \vec{E} .

§ 3. Излучение электрических зарядов, движущихся в диэлектрических средах

При движении заряженной частицы в веществе происходит взаимодействие ее с частицами вещества. В результате взаимодействия заряженная частица теряет свою энергию.

При распространении электромагнитной волны в веществе изменяется фазовая скорость распространения электромагнитной волны в n раз, где n — показатель преломления среды, являющийся функцией частоты электромагнитной волны. Так как скорость распространения электромагнитной волны в веществе $v = \frac{c}{n} < c$, то в веществе возможно движение заряда со „сверхсветовой скоростью“.

Электромагнитное поле неравномерно движущегося в диэлектрической среде заряда со скоростью $v < \frac{c}{n}$, так же как и поле заряда, движущегося в вакууме, может быть представлено как сумма двух полей: поля, движущегося вместе с заряженной частицей, и поля электромагнитной волны. Численные значения полей определяются формулами, аналогичными (3), (4), (5) и (6), с той лишь разницей, что величина $\beta = \frac{v}{c}$ должна быть заменена в них на βn . Точно так же при v близком к $\frac{c}{n}$ во всех фор-

мулах, характеризующих излучение в вакууме, при переходе к излучению в прозрачных диэлектриках величина $\beta = \frac{v}{c}$ должна быть заменена на βn .

При движении заряженной частицы в веществе со скоростью $v \geq \frac{c}{n}$ происходит излучение электромагнитной волны даже в том случае, если частица движется с постоянной скоростью; это так называемое излучение Вавилова-Черенкова. Теоретическое исследование данного вопроса [17, 18] приводит к следующим заключениям.

Максимум излучения имеет место в направлении \vec{n} , составляющем угол Θ с направлением скорости, при этом угол Θ определяется из следующего уравнения

$$\cos \Theta_{\omega} = \frac{1}{v/c n(\omega)}. \quad (21)$$

Энергия, излученная зарядом на единице длины его пути, определяется по формуле

$$\frac{dW}{dl} = \frac{e^2}{c^2} \int_0^{\omega_m} \omega \left(1 - \frac{c^2}{v^2 n^2} \right) d\omega, \quad (22)$$

где ω_m определяется из условия

$$\beta n(\omega_m) = 1.$$

Если принять для ε установленную в классической теории зависимость от частоты

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \frac{\omega_0^2}{\omega^2} (\varepsilon_0 - 1), \quad (23)$$

где ε_0 — статическое значение ε ;

ω_0 — собственная частота осцилляторов среды,

то формула (22) принимает следующий вид

$$\frac{dW}{dl} = \frac{e^2}{2v^2} \left[(\varepsilon_0 - 1) \ln \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_0 - 1} - \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \right] \omega_0^2. \quad (24)$$

Спектральное распределение определяется следующей формулой

$$\frac{dW_{\omega}}{dl} = \frac{e^2}{c^2} \left(1 - \frac{c^2}{v^2 \left[1 + (\varepsilon_0 - 1) \frac{\omega_0^2}{\omega^2 - \omega_0^2} \right]} \right) \omega. \quad (25)$$

Так как при $\omega > \omega_0$, $n < 1$ излучения не наблюдается, $m_0 \omega_0$ можно условно назвать граничной частотой излучения.

Таким образом, при движении электрона в диэлектрике со „сверхсветовой“ скоростью, электрон часть своей энергии расходует на излучение электромагнитных волн, однако эта энергия сравнительно невелика. Значительно большую энергию электрон теряет при столкновениях на ионизацию и возбуждение. Однако при возрастании скорости в релятивистской области потери энергии электрона происходят преимущественно благодаря излучению.

В 1940 г. Манделштамом была высказана идея, что при движении заряда в канале с очень малым радиусом ($r < \lambda$) излучение Вавилова — Черенкова должно происходить практически так же, как и в случае движения в самом диэлектрике, но при этом исключается основная доля потерь энергии электрона на ионизацию и возбуждение; таким образом, пробег электрона должен значительно возрасти, а вместе с ним должна возрасти и доля излучаемой электроном энергии. В дальнейшем этот вопрос был теоретически исследован Гинзбургом и Франком (7). В отличие от формулы, определяющей интегральное излучение на единицу длины при движении заряда непосредственно в диэлектрике см. (22), в случае движения в канале имеет место следующее уравнение

$$\frac{dW}{dt} = \frac{e^2}{c^2} \int \omega |g|^2 \left(1 - \frac{c^2}{n^2 v^2}\right) d\omega. \quad (26)$$

Как видно, формула (26) отличается от (22) наличием под интегралом множителя $|g|^2$. Этот множитель вычисляется через функции Бесселя и Вебера, оказывается, что он зависит от отношения $\frac{r}{\lambda}$. При $r \rightarrow \infty$ он стремится к нулю и при $r = 0$ (сплошной диэлектрик) $|g|^2 = 1$. Приблизительно можно считать, что если радиус канала удовлетворяет условию

$$r < 0,1 \frac{\lambda}{n},$$

то $|g|^2$ близко к единице и излучение электрона при его движении в канале происходит так же, как если бы электрон двигался в самом диэлектрике.

Таким образом, намечается второй путь получения электромагнитных волн непосредственно от движущихся электрических зарядов — при пропускании электронных пучков вблизи диэлектрика или через каналы в диэлектриках.

§ 4. Проблема группирования

Как видно из формул, приведенных в предыдущих параграфах, во всех случаях энергия электромагнитной волны, излучаемой непосредственно от движущихся электрических зарядов, пропорциональна квадрату величины заряда. На первый взгляд кажется, что это несущественно, так как речь идет об излучении электронов, величина же заряда каждого электрона вполне определен-

ная и равна $4,8 \times 10^{-10} CGSE$, однако при ближайшем рассмотрении вопроса оказывается, что это обстоятельство имеет чрезвычайно большое значение.

Дело в том, что можно себе представить электрический заряд, образованный большим числом электронов, находящихся в сравнительно небольшом объеме, т. е. своеобразный электронный сгусток или „пакет“. Если размеры сгустка будут значительно меньше излучаемой им длины электромагнитной волны, то нетрудно показать, что в этом случае излучение электронов, входящих в сгусток, будет когерентным и энергия излучения при этом будет пропорциональна квадрату заряда сгустка, а так как заряд сгустка

$$Q = eN,$$

где N — число электронов в сгустке, то излучение при всех прочих равных условиях движения возрастает по сравнению с излучением одного электрона не в N , а в N^2 раз.

Отсюда возникает чрезвычайно важная проблема „пакетирования“. Надо сказать, что образование таких сгустков весьма малой протяженности с большим числом электронов в сгустке, движущихся с большой скоростью и не располагающих во время движения, является задачей весьма нелегкой. Однако именно в проблеме пакетирования лежит возможность получения больших мощностей. Действительно, представим себе, что мы образовали сгустки с числом электронов равным 10^8 . Тогда излучение возрастет не в 10^8 раз, как это должно было бы быть при обычном излучении 10^8 беспакетированных электронов, а в 10^{16} раз, т. е. оно возрастет в сто миллионов раз по сравнению с тем, что мы имели бы, если просто увеличили ток в нашем приборе до такого значения, при котором в единицу времени пролетало бы через него 10^8 электронов.

Таким образом, если при каком-либо электронном токе в трубке, не изменяя условий высвечивания электронов, образовать из них пакеты, то излучение в приборе возрастет во столько раз, каково будет число электронов в пакете.

Для образования электронных пакетов практически возможно использование системы типа триода, в которой осуществляется пакетирование отсечкой тока с модуляцией потока по плотности. Более перспективной является система пакетирования при помощи пропускания электронного потока через резонатор, в котором происходит модуляция скорости электронного потока, с последующим группированием (явление такое же, какое имеет место при группировании в клистродах). Недостатком этого метода является то, что сформированный пакет в дальнейшем при движении довольно быстро распыляется, поэтому возникает мысль о поддержании электронного пакета в непрерывном поле бегущей волны, т. е. таким же образом, как это имеет место в лампах бегущей волны.

Таким образом, при создании электронного пакета с достаточно большим числом электронов, который удерживался бы и не распался на пути, достаточном для высвечивания, встречаются значительные трудности. Для решения этой задачи требуется использование всех новейших достижений в технике СВЧ и всех наших знаний в этой области. Тем не менее этот вопрос может быть в какой-то мере решен уже в настоящее время, а в дальнейшем всякий успех в этой области будет сопровождаться успехом и в получении миллиметрового и субмиллиметрового излучения.

§ 5. Экспериментальные работы по получению электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов от электрических зарядов, движущихся с ускорением в вакууме

Получение электромагнитных волн миллиметрового диапазона путем торможения электронного потока

Еще в 1936 году в ЛЭТИ автором данной статьи были проведены первые опыты по получению электромагнитных волн миллиметрового диапазона при торможении электронов в поле плоского конденсатора [6]. В этих опытах электроны, вылетевшие из электронной пушки, ускорялись диафрагмой. Пройдя по инерции сквозь отверстие диафрагмы, они попадали в область тормозящего поля, между плоскими электродами, где, теряя скорость, излучали электромагнитный импульс. При этом было показано, что в случае плоской конструкции электродов, т. е. при равномерном торможении электронов, длина волны, на которую приходится максимум излучаемой энергии, определяется по формуле

$$\lambda_{\max} = 2e \sqrt{\frac{2m}{e}} d \sqrt{\frac{U_1}{U_2}},$$

где

U_1 — разность потенциалов, ускоряющая электроны;
 U_2 — разность потенциалов, тормозящая электроны;
 d — расстояние между электродами A и B .

Из формулы видно, что для получения короткой длины волны λ_m достаточной интенсивности, необходимо, чтобы U_2 было велико, а U_1 — мало. Однако уменьшение U_1 нежелательно, так как оно приводит к уменьшению излучаемой энергии. Применение же малых d при больших U_2 практически ограничивается пробоем между электродами, что составляет основную трудность при проведении эксперимента.

Проведя тщательное обезгаживание электродов и выбрав соответствующую их форму, автору удалось создать электрические поля между электродами напряженностью до 10^6 в.см. При торможении электронов в таких полях было обнаружено электромагнитное излучение, интегральная интенсивность которого была порядка 10^{-8} вт.

Таким образом, при проведении экспериментальных работ в ДЭТИ были получены весьма небольшие мощности излучения, так как работы производились с непакетированным пучком. Вопрос о пакетировании, хотя принципиально и был нами уже намечен, но при состоянии техники СВЧ того времени не мог быть экспериментально решен. Однако эти опыты подтвердили принципиальную возможность получения электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов непосредственно от движущихся электрических зарядов.

Получение электромагнитных волн в ускорителях

Работы, посвященные излучению электронов в ускорителях, можно подразделить на две группы. Первая группа относится к проверке выводов теории „светящегося“ электрона и к выяснению влияния этого излучения на работу ускорителей. Вторая группа работ, появившихся в последние годы, ставит своей целью изучение возможностей получения в ускорителях электромагнитных волн миллиметрового диапазона.

Работами Иваненко, Померанчука, Швингера и др. [9, 10, 11, 12, 20], опубликованными в 1944 г. и позднее, было показано, что невозможно построить ускорители типа бетатронов с энергией более 100 мэв, ввиду того, что при этих скоростях имеет место интенсивное излучение электронов, приводящее к большим потерям их энергии.

При некоторой критической скорости потеря энергии на излучение оказывается равной энергии, приобретаемой электроном, чем и определяется „потолок“ работ бетатрона.

Первой экспериментальной работой по обнаружению влияния излучения на работу бетатрона явилась работа Блюнтта [21], опубликованная в 1946 г. Блюнтт установил заметное сжатие орбиты электрона вследствие потерь энергии на излучение. При энергии порядка 100 мэв потеря энергии на излучение согласно Блюнтту достигает 2%, а радиус орбиты с 83 см уменьшается приблизительно на 3 см. Однако само излучение Блюнтту обнаружить не удалось. Интересно отметить, что его неуспех в этом отношении объясняется тем, что, исходя из классической электродинамики, он предполагал в бетатроне наличие преимущественно микрорадиоволнового излучения. Однако, как мы видим, при ультрарелятивистских скоростях максимум излучения приходится на высокие обертоны порядка $n \sim \left(\frac{v}{mc^2}\right)^3$. Нетрудно показать, что при этом максимум излучения должен приходиться на область видимого света.

В полном согласии с этой теорией и с этим, как казалось на первый взгляд, парадоксальными выводами Поллоку и его соотрудникам, наконец, удалось в 1947 г. визуально обнаружить в синхротроне, являющемся модернизированным видоизменением

бетатрона, свечение, испускаемое движущимися электронами, настолько яркое, что оно было видно даже при дневном свете [22, 23].

В соответствии с теорией при 30 мэв свечение было красноватым, а при 100 мэв оно принимало голубовато-белый цвет. Явление было названо явлением „светящегося электрона“. После Поллока появились работы Гартмана и др., Королева и др. [24, 25, 26], посвященные изучению спектрального состава нового излучения, а также угловому распределению интенсивности излучения и поляризации. Все эти работы полностью подтвердили результаты теоретических исследований, приведенных выше.

Следует иметь в виду, что энергия излучения в синхротронах была сравнительно небольшой и достигала ощутимых величин лишь при очень больших энергиях электронов, благодаря некогерентности излучения, так как электроны при этом располагались по всей орбите.

Работ с ускорителями, отнесенных нами ко второй группе, весьма немного.

В 1946 г. Векслер и др. [27] предложили использовать синхротрон в качестве генератора электромагнитных волн миллиметрового диапазона. В 1950 г. этим вопросом занимался Рытов. Экспериментально исследовал на синхротроне возможность генерации ультракоротких волн Прохоров в 1948—1956 гг. [28]. Это единственная пока экспериментальная работа в направлении получения радиоволн непосредственно в ускорителях.

В работах Прохорова использовался синхротрон на энергию электронов в 5 мэв при радиусе орбиты 8 см. При этом, в силу специфики работы синхротрона, размер электронного пучка в нем был весьма велик, в угловой мере он достигал от 97 до 138°. В работе рассматривалось излучение 16-ой и 24-ой гармоник (длина волны

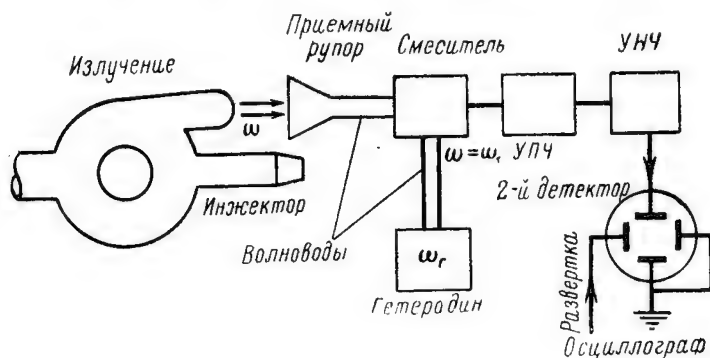


Рис. 10.

соответствовала 3 и 2 см), интенсивность излучения которых была оценена как теоретически, так и экспериментально в 10^{-6} вт. Схема установки приведена на рис. 10.

В связи с большими размерами ступок возможности интенсивной генерации миллиметровых и субмиллиметровых волн в синхротроне ограничены. По оценке Прохорова, при увеличении числа ускоренных электронов и напряжения на дуантах и переходе к более высоким гармоникам можно получить следующие значения мощности излучения в импульсе:

$$\lambda = 1 \text{ см} \sim 1 \text{ вт},$$

$$\lambda = 1 \text{ мм} \sim 10^{-2} \text{ вт},$$

$$\lambda = 0,1 \text{ мм} \sim 10^{-4} \text{ вт}.$$

Уменьшение энергии излучения при укорочении длины волны объясняется в этом случае тем, что с увеличением номера гармоники фактор когерентности уменьшается как $\frac{1}{n^2}$, в то время как релятивистский эффект возрастания излучения при переходе к более высоким гармоникам пропорционален n^4 . Таким образом, оба фактора сводятся к тому, что с возрастанием номера гармоники энергия уменьшается пропорционально n^{-2} .

Однако следует отметить, что экспериментальные возможности этого метода еще недостаточно изучены.

Работы с магнитным и электрическим ондуляторами

В 1953 г. Мотцем впервые была выполнена экспериментальная работа по получению электромагнитного излучения в магнитном ондуляторе — так им был назван прибор, в котором наблюдалось излучение релятивистских электронов, проходящих в поперечном пространственно периодическом стационарном магнитном поле [29]. Используемая им установка состояла из специального ускорителя электронов, собственно ондулятора и ряда измерительных устройств (рис. 11).

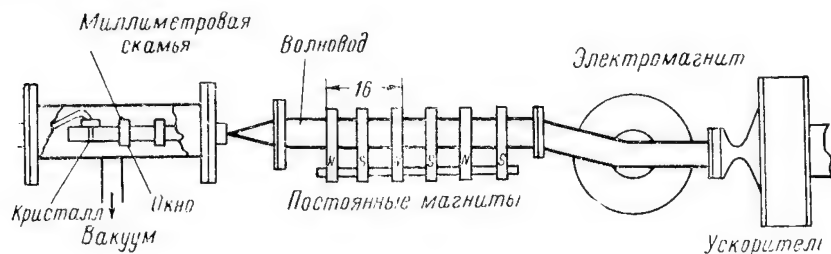


Рис. 11.

Мотцем были поставлены два эксперимента: при энергии электронов в 100 мэв по обнаружению видимого света и при энергии 3–5 мэв — по получению электромагнитных волн миллиметрового диапазона.

В первом случае использовался линейный ускоритель Стэнфордского университета, во втором — специальный ускоритель, являющийся одновременно и группирователем электронов. Ондюлятор представлял собою систему из 25 постоянных магнитов (50 полюсных зазоров), расположенных на расстоянии 20 мм друг от друга, причем соседние зазоры обладали противоположно направленными магнитными полями. Электроны пролетали по оси установки в откачанном волноводе. Опыт с видимым излучением ставил задачей только наблюдение излучения, что и было достигнуто.

Группирование при опытах по получению волн миллиметрового диапазона приводило к образованию сгустков с углом (по фазе) в 30° . Измерение получаемой мощности производилось кристаллическим детектором и термисторным мостом. Мотцем было получено излучение при длине волны $1,9 \text{ мм}$, мощностью порядка 1 вт (в импульсе).

В работе отмечается, что фокусировка электронного пучка в ондуляторе была весьма несовершенна, так что до 90° пучка терялось на первых 15 см пути в ондуляторе. В этом обстоятельстве, а также в том, что в сгустке было не более $2 \cdot 10^6$ электронов, нужно искать причину расхождения между полученной мощностью и той ее величиной, которая определялась теоретическим расчетом — порядка нескольких киловатт.

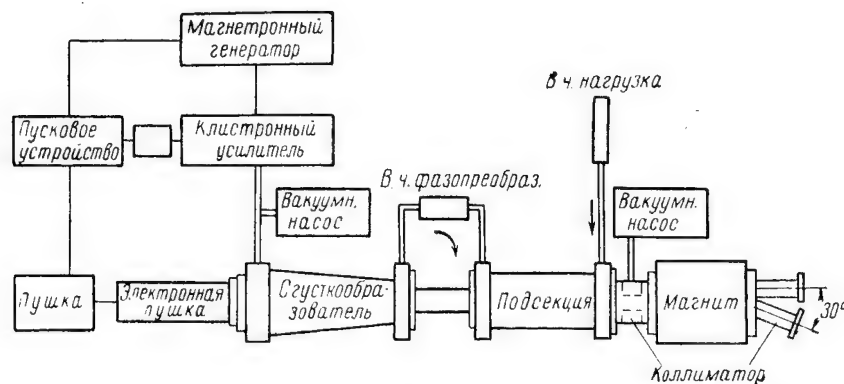


Рис. 12.

В 1955 г. появилась экспериментальная работа Комба и Фрело [30]; они также работали с магнитным ондулятором. Схема их установки приведена на рис. 12. Она в общих чертах повторяет установку Мотца. Период ондулятора равнялся 16 см. Энергия электронов равнялась 2,3 МэВ.

Теоретическое значение мощности в импульсе при полной когерентности равнялось $1,38 \text{ вт}$ при $\lambda = 6,16 \text{ мм}$.

Экспериментально была обнаружена мощность порядка $\sim 1 \text{ мвт}$ при $\lambda = 5,65 \text{ мм}$, точнее, на эту длину волны приходилась максимальная интенсивность в спектре, который был определен от 4,8 до 8 мм.

Малое значение полученной мощности указывает на слабую степень группирования электронов.

Перейдем теперь к рассмотрению экспериментальных работ по получению электромагнитных волн миллиметрового диапазона при движении зарядов в диэлектрических средах, т. е. к эффекту Вавилова — Черенкова.

§ 6. Экспериментальные работы по получению электромагнитных волн миллиметрового диапазона при движении электрических зарядов в диэлектрических средах

Эффект Вавилова—Черенкова в области световых волн

Прежде всего несколько слов о результатах, полученных при наблюдении излучения с длиной волны, приходящейся на видимую часть спектра, от электронов, движущихся в диэлектрических средах со сверхсветовой скоростью.

Излучение сверхсветового электрона было обнаружено Вавиловым и Черенковым еще в 1934 г. и наиболее подробно исследовано Черенковым в период 1937 — 1944 гг. [31, 32, 33, 34]. Излучение велось на пучках вторичных электронов, полученных в жидкостях в результате эффекта Комптона, вызванного γ -излучением радиоактивных изотопов. Теория явления была дана Таммом и Франком (17)

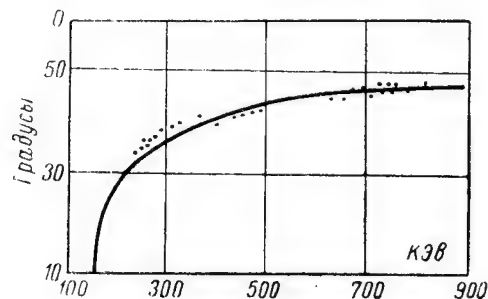


Рис. 13.

Подожжения теории были проверены рядом исследователей: Козлингом и Риллингом (1938 г.), Виковым и Гиндерсоном (1943 г.), Гардингом и Гиндерсоном (1948 г.) и др.

Все перечисленные работы подтвердили результаты теоретических исследований. Подтвердились формулы, определяющие

интенсивность излучения, распределение энергии в спектре, направление излучения и т. д. (см., например, рис. 13, на котором сплошная линия показывает теоретическую зависимость энергии излучения от частоты, результаты же эксперимента нанесены на графике точками. Виков и Гиндерсон проверили основную формулу, определяющую направление излучения, в широком диапазоне скоростей электронов от 240 до 814 кэв. Одновременно было подтверждено, что эффект Вавилова—Черенкова наблюдается только при таких скоростях электронов, когда $v > \frac{c}{n}$.

В настоящее время этот эффект в видимой и ультрафиолетовой частях спектра нашел широкое применение в приборах для счета элементарных частиц (см., например, статьи Маршалла, где приводится обширный обзор по черенковским счетчикам) [35].

Эффект Вавилова—Черенкова в области волн миллиметрового диапазона

Как было указано ранее, для снижения потерь, связанных с взаимодействием электронов с веществом, можно „высвечивать“ электронный пучок, пропуская его в канале диэлектрика. При этом надо только иметь в виду, что расстояние от пучка до диэлектрика должно быть меньше $0,1 \frac{\lambda}{n}$.

Практически при прохождении пучка над диэлектриком расстояние это конечно и равно r ; таким образом, все волны, длина которых настолько мала, что условие

$$r < 0,1 \frac{\lambda}{n}$$

не удовлетворяется, практически не излучаются. Вследствие этого кривая распределения энергии в спектре имеет вид, изображенный на (рис. 14). Вместо возрастания энергии с частотой, как

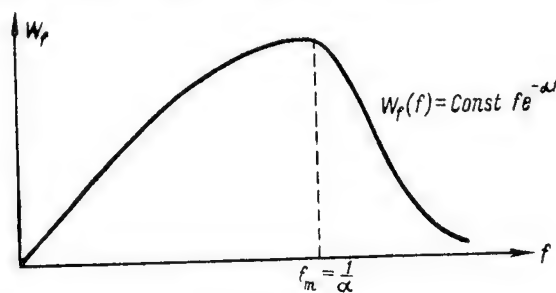


Рис. 14.

это следует из теории эффекта Вавилова—Черенкова, наблюдается максимум, положение которого зависит от расстояния пучка до диэлектрика. Для того, чтобы максимум интенсивности пришелся на длину волны субмиллиметрового или миллиметрового диапа-

зона и при этом общая энергия излучения была достаточно велика, необходимо, чтобы расстояние это было возможно меньше. Однако практически пропустить электронный пучок над диэлектриком на очень малом расстоянии от него весьма трудно. Эта трудность при получении электромагнитного излучения от зарядов, движущихся над диэлектриком, является, таким образом, дополнительной к тем, с которыми мы уже познакомились, рассматривая вопрос излучения электромагнитных волн при движении зарядов в вакууме (формирование пучков, пакетирование, получение больших энергий и т. д.).

Известна лишь одна работа, в которой сделана попытка применить эффект Вавилова—Черенкова для генерации радиоволн миллиметрового диапазона, авторы ее — сотрудники Колумбийского университета М. Данос и Н. Лашинский [36]. Схема их установки приведена на рис. 15.

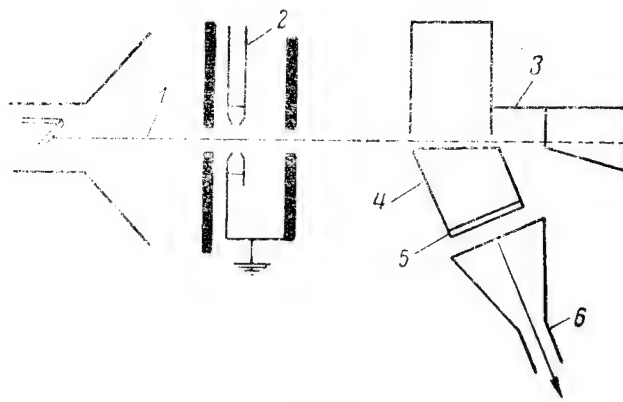


Рис. 15.

Сгруппированный в резонаторе 2 при помощи клистронного генератора электронный пучок 1 двигался над призмой 4, изготовленной из TiO_2 , и затем попадал в клетку Фарадея. Металлический цилиндр 3 отражал излучение и направлял его в призму. Выход из призмы обеспечивался при помощи согласующей пластины 5. Излучение далее попадало в рупор 6, соединенный с волноводом. Электроны получались с ленточного вольфрамового катода. Ширина электронного пучка равнялась 4 мм, толщина — 0,03 мм. Длина пучка над диэлектриком 1,7 см, величина тока в пучке 0,4 мА.

Авторы получили излучение мощностью 10^{-7} Вт, что совпало с данными расчета. В следующей работе они предполагают с помощью магнитного поля напряженностью 10 000 Гс сформировать электронный пучок толщиной 0,01 мм. Авторы надеются при этом получить 10^{-7} Вт на длине волны в 1 мм.

Заключение

Проведенный нами обзор работ по получению электромагнитного излучения непосредственно от движущихся электрических зарядов позволяет сделать следующее заключение.

Принципально доказана возможность генерирования электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов при движении электронов с ускорением в электрических и магнитных полях, а также при движении электронов со сверхсветовой скоростью в диэлектриках и вблизи диэлектрических сред. Однако больших мощностей излучения пока получить не удалось. Наибольшая мощность, полученная Мотцем при ускоренном движении электрических зарядов в вакууме, имеет порядок одного ватта. Использование эффекта Вавилова—Черенкова привело к получению мощностей порядка 10^{-7} вт.

Основные трудности при получении радиоволн этими методами заключаются в необходимости тщательной фокусировки и пакетирования электронных пучков, изыскания физических условий, при которых созданные пакеты не распались бы на протяжении такого пути, при котором произошло бы достаточное отпочкование электромагнитной энергии, т. е. волны от зарядов.

Второстепенными трудностями являются: передача электронам достаточно больших энергий и получение достаточно больших их ускорений.

При использовании эффекта Вавилова—Черенкова дополнительной трудностью является удержание сформированного электронного луча вблизи диэлектрической среды.

Однако эти методы таят в себе большие возможности. Действительно, как указывалось в опытах Мотца, электронный пакет содержал всего $\sim 2 \cdot 10^6$ электронов. Представим себе, что, преодолевая технические трудности, удастся увеличить число электронов в пакете, доведя его до $\sim 2 \cdot 10^9$, тогда излучение возрастет \sim в 10^6 раз, т. е. мощность излучения будет уже порядка тысячи киловатт в импульсе. Возможно, что осуществить сразу такое пакетирование не удастся, однако каждый раз при успехе экспериментатора, выражающемся в увеличении числа электронов в пакете на один порядок, он будет вознаграждаться увеличением на два порядка мощности излучаемой электромагнитной волны.

В настоящее время уже намечаются пути усовершенствования формирования и пакетирования электронных потоков и можно надеяться, что эти методы принесут нам новые еще невиданные мощности в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах радиоволн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bell R. L., Heller M., PIRE., 1156—1159, 1956.
2. G. E. Helmke, Bell Lab. Rec., 31, 286—290, 1953.
3. Беккер, Электронная теория, ОНТИ, 1936.

4. Иваненко и Соколов, Классическая теория поля, ГИИТЛ, 2-е изд. 1951.
5. К. Н. Крылов, ДЭТИ, отчет ОНИР, Разработка метода получения сантиметровых и миллиметровых волн, 1936.
6. К. Н. Крылов, Известия ДЭТИ, № 32, 1957.
7. В. Л. Гинзбург и П. М. Франк, ДАН СССР, т. 56, 699, 1947.
8. Г. А. Аскар'ян, ЖЭТФ, т. 27, вып. 6, 761, 1954.
9. Г. А. Аскар'ян, ЖЭТФ, т. 30, вып. 3, 584, 1956.
10. Арцимович и Померанчук, J. of Ph. USSR, т. 9, 267, 1945.
11. „Rev. Sc. Instr. Schiff“, т. 17, 6, 1946.
12. Иваненко и Соколов, ДАН СССР, ч. 59, 1551, 1948.
13. В. Л. Гинзбург, Изв. АН СССР, сер. физич., ч. 11, 165, 1947.
14. H. Motz, „Journ. of Appl Phys.“, т. 22, 252, 1951.
15. Combe R. et Feix M., C. R. Acad. Sci. Paris, т. 237, 1318, 1953.
16. Combe R. et Feix M., C. R. Acad. Sci. Paris, т. 237, 1660, 1953.
17. И. Е. Тамм и П. М. Франк, ДАН СССР, т. XIV, № 3, 1937.
18. П. М. Франк, т. XXX, вып. 3-4, 1946.
19. Иваненко и Померанчук, ДАН СССР, т. 41, 343, 1944.
20. J. Schwinger, Phys. Rev., т. 75, 1912, 1949.
21. Blewett, Phys. Rev., т. 69, 87, 1946.
22. Pollock H., Phys. Rev., т. 71, 829, 1947.
23. Pollock H., Phys. Rev., т. 74, 52, 1948.
24. Hartman, Tombullion, Phys. Rev., т. 87, 233, 1952.
25. Hartman, Tombullion, Phys. Rev., т. 91, 1577, 1953.
26. Ф. Королев, М. Марков, Е. Акимов, О. Куликов, ДАН СССР, ч. 110, 542, 1956.
27. Векслер и др., Миллитрон -- новый эффективный способ генерации радиоволн и миллиметрового диапазона, отчет ФИАН, 1946.
28. А. Прохоров, Радиотехника и электроника, т. 1, 71, 1956.
29. H. Motz, W. Thou and R. Whitehurst, Journ. of Appl Phys., т. 24, 826, 1953.
30. Combest, Tielot, C. R. Acad. Sci. Paris, т. 241, № 22, 1559, 1955.
31. С. И. Вавилов ДАН СССР т. 2, 1934.
32. П. А. Черенков, ДАН СССР, т. II, № 8, 1934.
33. П. А. Черенков, ДАН СССР, т. XIV, № 3, 1937.
34. П. А. Черенков, Труды ФИАН АН СССР, т. 2, № 4, 1944.
35. Маршалл, Счет частиц по черенковскому излучению, Phys. Rev., т. 86, 685 -- 693, 1952.
36. Данос и Лашинский, Генерация миллиметровых волн посредством излучения Черенкова, Journ. of Appl. Phys., т. 21, 1952.

Канд. техн. наук А. Д. СУШКОВ

О ВЛИЯНИИ ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА И МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЭКРАНА НА ГРУППИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ

На процесс группирования электронов большое влияние оказывает объемный заряд. В том случае, когда группирование отсутствует, действие электронного объемного заряда (имеющего только постоянную слагающую) проявляется в расширении луча. Однако применение соответствующего магнитного поля или наличие достаточного количества положительных ионов позволяет уравновесить силы взаимного расталкивания электронов и получить однородный поток, в котором все электроны, двигаясь по параллельным траекториям, обладают равными продольными скоростями.

При группировании же электронов появляется переменная слагающая объемного заряда, действие которой невозможно скомпенсировать ни постоянным магнитным полем, ни малоподвижными положительными ионами.

Исследование процесса группирования с учетом объемного заряда в общем виде очень затруднительно, оно может быть успешно осуществлено лишь при соответствующих упрощениях проблемы, в частности, при однородности луча.

Электронный поток с бесконечно большим диаметром

Предположение о бесконечности диаметра потока дополнительно упрощает исследуемую проблему, позволяя решать ее как одномерную задачу.

Теория группирования электронов луча бесконечного диаметра исходит из того, что однородный электронный поток, постоянная слагающая объемного заряда которого скомпенсирована положительными ионами, представляет собой колебательную среду. В клистроне колебательный процесс при нерелятивистских скоростях и сравнительно небольших параметрах группирования можно представить себе следующим образом.

Электроны луча, вылетевшие из прожектора с одинаковыми постоянными скоростями, после скоростной модуляции во вход-

ном (модулирующем) устройстве начинают группироваться в сгустки (или пакеты). Процесс группирования в пролетной трубе, сопровождаемый нарастанием электростатических (кулоновых) сил, препятствующих сближению электронов, продолжается до тех пор, пока переменные слагающие скорости не будут полностью затрачены на преодоление сил расталкивания, т. е. когда переменная слагающая кинетической энергии перейдет в потенциальную энергию сгустка. После этого под действием сил объемного заряда начнется обратный процесс — процесс разгруппирования. Электроны сгустков будут расходиться вдоль направления движения луча, а потенциальная энергия перейдет в кинетическую. Вновь приобретя переменные скорости, электроны снова начинают группироваться.

Такое чередование в пределах луча процессов группирования и разгруппирования электронов и происходящее при этом постоянное преобразование кинетической энергии в потенциальную и обратно для наблюдателя, передвигающегося со скоростью луча, представлялось бы как колебание электронного потока.

При помощи указанной теории можно рассчитать переменный ток, образующийся в результате группирования. Так, например, в двухрезонаторном клистроне амплитуда n -й гармоники тока определяется выражением [1,2]

$$i_{m_n} = 2i_0 J_n(nX), \quad (1)$$

где

i_0 — постоянная слагающая тока луча,
 J_n — функция Бесселя первого рода n -го порядка,
 X — параметр группирования.

Учет электростатических сил продольного расталкивания (обусловленных переменной слагающей объемного заряда) производится при помощи входящего в выражение для параметра группирования

$$X = v_z \frac{\sin a\zeta}{a\zeta} = \frac{v}{a} \sin a\zeta \quad (2)$$

отношения $\frac{\sin a\zeta}{a\zeta}$, так как при кинематическом расчете X определяется просто произведением коэффициента скоростной модуляции v на статический угол пролета в пролетной трубе ζ , т. е. $X = v\zeta$.

Следовательно, в результате действия переменной слагающей объемного заряда уменьшается эффективный параметр группирования. Однако оптимальная величина X , соответствующая максимальной амплитуде данной гармоники, всегда может быть достигнута путем повышения амплитуды модулирующего напряжения U_m , входящей в коэффициент модуляции

$$v = -\frac{U_m}{2U_0} M,$$

где

U_0 — постоянное ускоряющее напряжение,
 M — коэффициент взаимодействия электронного луча с электрическим полем резонатора.

Из выражения (2) также следует, что максимальная плотность сгустков получается при

$$|\sin a\zeta| = 1,$$

т. е. когда параметр разгруппирования

$$a\zeta = (2n + 1)\frac{\pi}{2} \quad (n = 0, 1, 2, 3 \dots),$$

но поскольку при этом абсолютная величина

$$\frac{\sin a\zeta}{a\zeta},$$

а следовательно, и $|X|$ будут наибольшими при $n = 0$, то на практике используется лишь первое значение $a\zeta$, а именно:

$$a\zeta = \frac{\pi}{2}.$$

Коэффициент a представляет собой отношение

$$a = \frac{\omega_e}{\omega},$$

где

ω_e — круговая частота собственных колебаний плазмы,
 ω — круговая частота сигнала.

Частота плазмы, в свою очередь, определяется выражением

$$\omega_e = \sqrt{4\pi \frac{e}{m} \rho_0} = 1,83 \cdot 10^{10} j_0^{1/2} U_0^{-1/4}, \quad (3)$$

где

$\frac{e}{m}$ — отношение величины заряда электрона к величине его массы,

ρ_0 и j_0 — постоянные слагающие объемной плотности электронного заряда и плотности тока.

Учитывая, что статический угол пролета равен

$$\zeta = \frac{\omega l}{v_0},$$

где

l — длина участка группирования,
 $v_0 = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_0}$ — скорость электронов,

параметр разгруппирования можно представить также следующим образом:

$$a\zeta = \frac{\omega_e}{\omega} \frac{\omega l}{v_0} = \frac{\omega_e l}{v_0} = hl,$$

где

$$h = \frac{\omega c}{v_0} = 309 f_0 : U_0^{-1/2}. \quad (4)$$

Таким образом, равенство

$$a_z^2 = -\frac{\pi}{2} \text{ или } hl = -\frac{\pi}{2} \quad (5)$$

имеет большое значение при проектировании катодов, так как оно позволяет либо вычислить оптимальную длину пролетного пространства, если задан режим питания, либо определить режим питания при заданной длине пролетного пространства.

Электронный поток конечного диаметра

Предположение о бесконечности диаметра электронного потока является, очевидно, чисто идеальным. На практике луч всегда имеет конечный диаметр, поэтому переменное электрическое поле, созданное объемным зарядом, имеет не только продольную составляющую (как это было при бесконечно широком луче), но также и поперечную составляющую. Если исходить из того, что в объеме сгустка заряды распределены равномерно и для наглядности изобразить поток электрического поля при помощи силовых линий, то отношение между поперечной и продольной составляющими поля будет выражаться отношением площадей соответственно боковой и торцевой поверхностей сгустка.

В том случае, когда сгустки имеют малую протяженность s

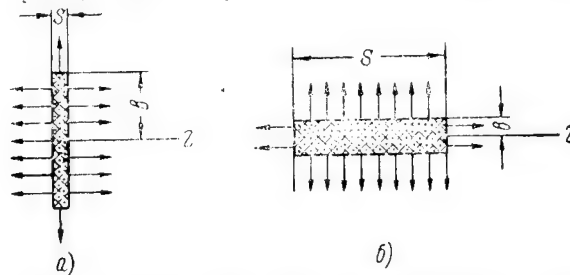


Рис. 1. Схематическое изображение форм электронных сгустков: стрелками показано направление силовых линий электрического поля.

по сравнению с радиусом луча b (тонкие диски) (рис. 1, а), можно приблизительно считать, что весь поток поля проходит через торцевые поверхности и обуславливает продольное расталкивание электронов.

Следовательно, при условии

$$s \ll b \quad (6)$$

выражения, справедливые для бесконечно широкого луча, без всяких изменений применимы и для луча с конечным диаметром.

Обычно протяженность сгустков при оптимальном группировании не превосходит четверти электронной волны, т. е.

$$s \leq \frac{1}{4} v_0 T,$$

где

T — период колебаний.

Поэтому условие (6) можно записать также в виде

$$T \ll \frac{4b}{v_0} \quad \text{или} \quad \gamma b \gg \frac{\pi}{2}, \quad (6')$$

где

$$\gamma = \frac{\omega}{v_0}.$$

Если сгустки имеют большую протяженность по сравнению с радиусом луча (длинные тонкие цилиндры) (рис. 1, б), то практически весь поток электрического поля будет проходить через боковую поверхность сгустков и обуславливать поперечное разгруппирование электронов. В этом случае, т. е. когда

$$s \gg b \quad \text{или} \quad \gamma b \ll \frac{\pi}{2}, \quad (7)$$

продольное расталкивание электронов незначительно, поэтому исследование процесса группирования можно производить на основе кинематического расчета, учитывая при этом потери тока луча на стенках пролетной трубы за счет поперечного разгруппирования. При использовании магнитной фокусировки луча такие потери обычно отсутствуют.

Таким образом, продольное разгруппирование электронов, вызываемое продольной слагающейся электрического поля объемного заряда, зависит от радиуса луча.

В зависимости от величины радиуса b (или γb) изменяется частота продольных колебаний плазмы, которая в общем случае может быть выражена следующим образом:

$$\omega'_e = k(\gamma b) \omega_e,$$

где

ω_e — частота плазмы в бесконечно широком луче,
 $k(\gamma b)$ — коэффициент понижения частоты плазмы, зависящий от γb .

Учитывая выражение (3) и равенство

$$j_0 = \frac{i_0}{\pi b^2},$$

можно написать, что

$$\omega'_e = 1,83 \cdot 10^{10} j_0^{1/2} U_0^{-1/2} k(\gamma b) = 1,03 \cdot 10^{10} i_0^{1/2} U_0^{-1/2} \frac{k(\gamma b)}{b}.$$

На основании вышеприведенных рассуждений можно заключить, что по мере изменения радиуса луча от 0 до ∞ коэффи-

коэффициент $k(\gamma b)$ должен изменяться от 0 до 1. Однако для определения функции $k(\gamma b)$ при любых значениях γb [это необходимо в связи с тем, что на практике очень часто радиус луча не удовлетворяет условиям (6') и (7)] надо прежде всего установить зависимость продольной составляющей электрического поля E_z от радиуса b .

В простейшем случае такая проблема решается как одномерная электростатическая задача в системе координат, движущейся со скоростью луча, и в предположении периодичности процесса группирования в пространстве: иначе говоря, предполагается, что сгустки электронов одинаковы и симметричны в пространстве относительно своих центров или все параметры, характеризующие процесс группирования (скорость, смещение электронов, плотность объемного заряда, электрическое поле), в любой момент времени распределены в пространстве периодически. Однако следует отметить, что в действительности процесс группирования периодичен лишь во времени, а не в пространстве. Это видно из того, что электроны, образующие сгусток, получают изменения скорости не одновременно, а в течение периода колебаний модулирующего напряжения; поэтому электроны, прошедшие зазор входного резонатора раньше других (составляющие фронт сгустка), начинают уже группироваться, в то время как другие электроны (тыл сгустка) еще не прошли зазор. В результате сгусток оказывается несимметричным относительно своего центра. Только в том случае, когда время пролета, необходимое для оптимального группирования электронов, значительно больше периода колебаний модулирующего напряжения, электронный сгусток практически можно считать симметричным.

Продольная составляющая переменного электрического поля E_z в любой точке луча определяется путем суммирования в этой точке полей всех элементов объемного заряда. Наиболее просто E_z рассчитывается вдоль оси луча. Учитывая периодическое распределение объемного заряда и представляя его в виде бесконечного ряда

$$\rho = \rho_0 \sum_{n=1}^{\infty} x_n \cos(nz),$$

можно найти, что электрическое поле в любой точке z на оси луча равно [3]

$$E_{z0} = 2\rho_0 \lambda_c \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} x_n k_n^2(\gamma b) \sin(nz),$$

где $\lambda_c = v_0 T$, а коэффициент $k_n(\gamma b)$, выражающий влияние конечности величины радиуса луча на электрическое поле, равен

$$k_n(\gamma b) = k(n\gamma b) = 1 - (n\gamma b) K_1(n\gamma b), \quad (9)$$

где

K_1 — модифицированная функция Бесселя первого рода и первого порядка.

Расчет переменного тока показывает, что выражение (1) может быть применено к лучам конечных размеров, если вместо ω_e в параметр группирования подставить $\omega'_{en} = k(n\gamma b) \omega_e$, тогда

$$i_{m_n} = 2i_0 J_n \left(\frac{\gamma}{a'_n} \sin a'_n \zeta' \right),$$

где

$$a'_n = \frac{\omega'_{en}}{\omega} = 174 \sqrt{\frac{i_0}{U_0^{3/2}}} \frac{k(n\gamma b)}{\gamma b}. \quad (10)$$

Таким образом, функция $k(n\gamma b)$ (рис. 2) представляет собой искомый коэффициент понижения частоты плазмы, зависящий от радиуса луча, а также вида (мода) колебаний. Последнее свидетельствует о том, что электронный поток с ограниченным радиу-

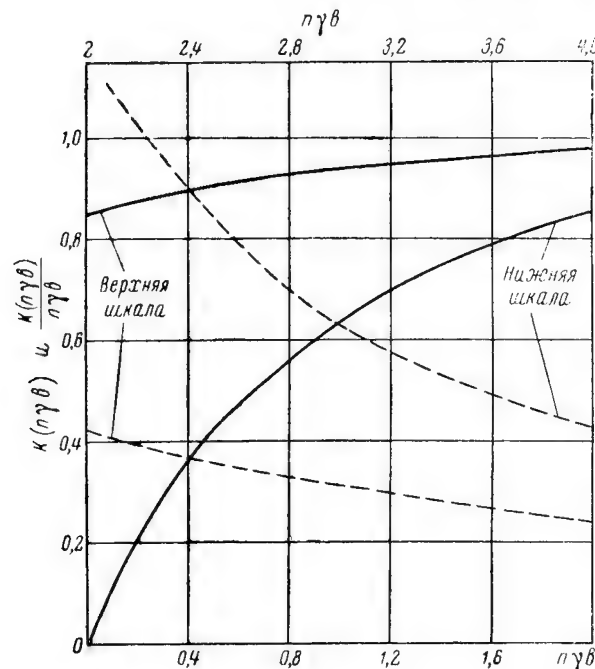


Рис. 2. Функции $k(n\gamma b)$ (сплошные линии) и $\frac{k(n\gamma b)}{n\gamma b}$ (штриховые линии), характеризующие изменения частоты плазмы и электростатического расталкивания электронов в зависимости от радиуса луча.

сом является средой, обладающей дискретным спектром частот колебаний, из которых наименьшая $\omega'_{en} = k(\gamma b) \omega_e$ и наибольшая

ная $\omega'_{c_n} = \omega_p$; каждая из этих частот соответствует определенной гармонике плотности объемного заряда или тока.

Понижение частоты колебаний плазмы приводит к изменению оптимальной длины пролетной трубы, которая определяется из равенства $a'_{opt} = \frac{\pi}{2}$ и при заданном режиме питания выражается

$$l'_{opt} = \frac{9 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{\frac{i_0}{U_0^{1/2}}}} \cdot \frac{b}{k(n_1 b)}. \quad (11)$$

Если же задана длина пролетной трубы, то из приведенного равенства можно определить оптимальный ток луча

$$i'_{0_{opt}} = 8,1 \cdot 10^{-5} U_0^{1/2} \cdot \frac{b^2}{l^2} \cdot \frac{1}{k^2(n_1 b)}. \quad (12)$$

Как видно из рис. 2, при радиусе луча $n_1 b > 2$ коэффициент понижения частоты плазмы для любой гармоники n равен $k(n_1 b) \approx 1$, поэтому выражения (11) и (12) превращаются в выражения, соответствующие бесконечно широкому лучу

$$l_{opt} = \frac{9 \cdot 10^{-3} b}{\sqrt{\frac{i_0}{U_0^{1/2}}}} \quad (11')$$

и

$$i_{0_{opt}} = 8,1 \cdot 10^{-5} U_0^{1/2} \cdot \frac{b^2}{l^2}, \quad (12')$$

а формула для переменного тока - в формулу (1).

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

При сохранении постоянства плотности тока j_0 уменьшение диаметра луча приводит к увеличению оптимальной длины трубы по отношению к длине трубы при бесконечно широком луче

$$l'_{opt} = \frac{l_{opt}}{k(n_1 b)}$$

(рис. 3) и, естественно, к уменьшению тока i_0 . Если же поддерживать постоянным ток луча i_0 (или перманент $\frac{i_0}{U_0^{1/2}}$), то с уменьшением b плотность тока j_0 будет расти, а оптимальный угол пролета $\alpha'_{opt} = \alpha_{opt}$, согласно выражению (11), изменяться по закону $\frac{1}{k(n_1 b)}$.

Все приведенные рассуждения справедливы для электронов, расположенных на оси луча. В точках, находящихся вблизи поверхности луча, продольные составляющие электрического поля вследствие краевых эффектов будут отличаться от E_z , поэтому эффективность группирования электронов будет различной в зависимости от их радиального положения. Неравномерность групп-

пирования электронов по радиусу луча еще более усиливается при наличии металлического экрана, влияние которого до сих пор не учитывалось.

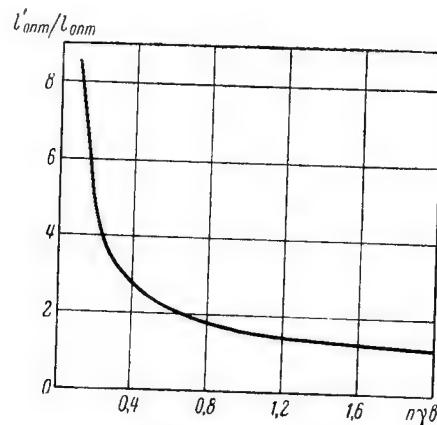


Рис. 3. Изменение оптимальной длины пролетной трубы по отношению к длине трубы при бесконечно широком луче и зависимости от радиуса луча.

Влияние металлического экрана

В реальных лампах (клистронах, ЛБВ и др.) электронные лучи, как правило, проходят через металлические трубы (цилиндрические или какой-либо другой конфигурации) (рис. 4). Элек-

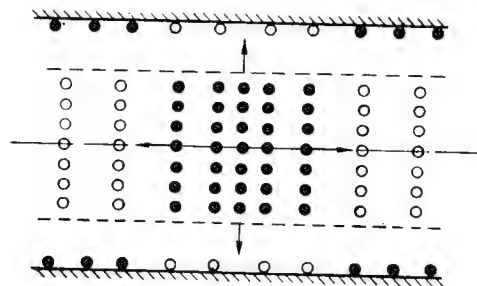


Рис. 4. Схематическое изображение отрицательных (черные точки) и положительных (светлые точки) зарядов, содержащихся в сгруппированном луче, а также зарядов, наведенных на стенке пролетной трубы (экране).

тронные сгустки, образующиеся при группировании луча, наводят на стенке трубы (экрана) противоположные по знаку заряды, поле которых искажает распределение собственного электрического поля сгустков. При этом продольное расталкивание электронов, а следовательно, и эффективность группирования их по радиусу становится неравномерной.

Наиболее ранние и подробные исследования процесса группирования с учетом влияния металлического экрана были проведены Ханом [4] и Рамо [5] на основании электронно-волновой теории. Эта теория рассматривает периодические изменения скорости и плотности электронного луча как взаимодействие волн объемного заряда и базируется на решении уравнений Максвелла при соответствующих граничных условиях. При этом автоматически учитываются влияние объемного заряда, конечные размеры луча и изменение поля объемного заряда при наличии металлического экрана, окружающего поток. Из анализа, ограниченного малыми параметрами группирования, нерелятивистскими скоростями электронов, полной компенсацией постоянной слагающей отрицательного объемного заряда положительными ионами и наличием сильного аксиального магнитного поля, было найдено, что коэффициент понижения частоты плазмы на оси электронного луча зависит только от отношения радиальной постоянной распространения T к постоянной распространения свободного пространства $\gamma = \frac{\omega}{c}$

$$\frac{\omega'}{\omega_p} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{T^2}{\gamma^2}}}. \quad (13)$$

Постоянная T зависит от пространственной конфигурации луча и окружающих его металлических стенок. Рамо рассмотрел только случай цилиндрического луча внутри цилиндрической трубы и получил следующее трансцендентное уравнение для T :

$$Tb \frac{J_1(Tb)}{J_0(Tb)} = \gamma b \frac{I_1(\gamma b) K_0(R\gamma b) + I_0(R\gamma b) K_1(\gamma b)}{I_0(\gamma b) K_0(R\gamma b) - I_0(R\gamma b) K_0(\gamma b)}, \quad (14)$$

где

$J_0, J_1, I_0, I_1, K_0, K_1$ — функции Бесселя и
 R — отношение радиуса пролетной трубы к радиусу луча b .

Для более общего случая, а именно для кольцевого потока в кольцевой трубе, выражение для T дается в работе Бранча и Мирана [6].

Зависимость коэффициента понижения частоты плазмы от радиусов луча и экрана, вычисления при помощи выражений (13) и (14), приводится на рис. 5 и 6, откуда видно, что влияние экрана на частоту плазмы на оси луча невелико (рис. 6).

Для того, чтобы определить влияние экрана на другие участки луча, удаленные от оси на расстояние r , следует иметь в виду, что распределение потенциала по радиусу потока в цилиндрической трубе представляется выражением [5]

$$U = C J_0(Tr), \quad (15)$$

где C — постоянная, определяемая из начальных условий.

С этой точки зрения большой практический интерес имеет работа Е. Финберга [7] по исследованию процесса группирования в клистроне.

Е. Финберг представил поле в пролетной трубе клистрона в виде суммы волн объемного заряда, каждая из которых имеет

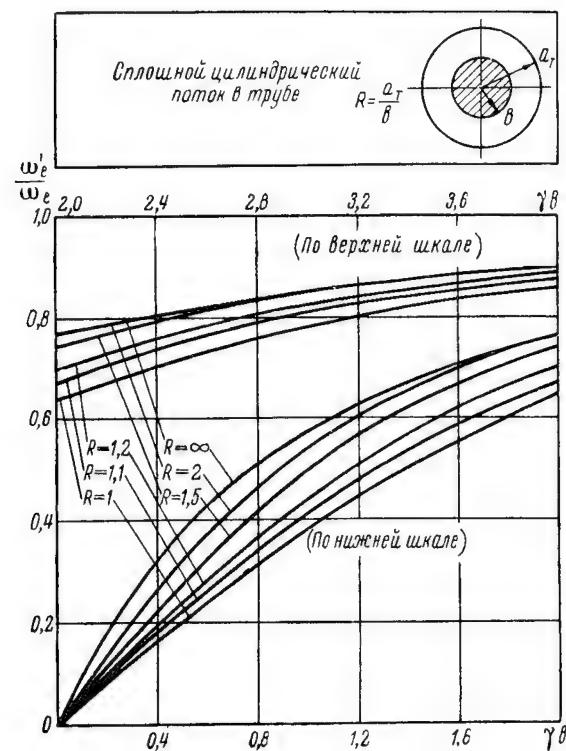


Рис. 5. Изменение коэффициента понижения частоты плазмы в зависимости от γb при различных соотношениях между радиусами пролетной трубы и электронного луча.

свою собственную частоту колебаний, зависящую не только от плотности зарядов, но и от радиуса пролетной трубы. При тех же ограничениях, что и у Рамо, он нашел, что продольное разгруппирование электронов в любой точке луча, удаленной от оси на расстояние r , определяется функцией

$$F_1(hl, r, \gamma b, R),$$

которая для частного случая (когда $\gamma b = 2$, $l' = 1$ и зазор входного резонатора не имеет сеток) приведена на рис. 7.

М. Ходоров, Е. Гиндтон и Е. Налос [8] экспериментально доказали, что теория Финберга может быть произвольно экстраполирована на область больших величин параметра группирования (вплоть до $\gamma \approx 3,5 \div 4$ и $a \approx hl = 3 \div 3,5$) и при расчете основной гармоники переменного тока использовано выражение

$$i_{m1} = 2i_0 J_1(\gamma F_1). \quad (16)$$

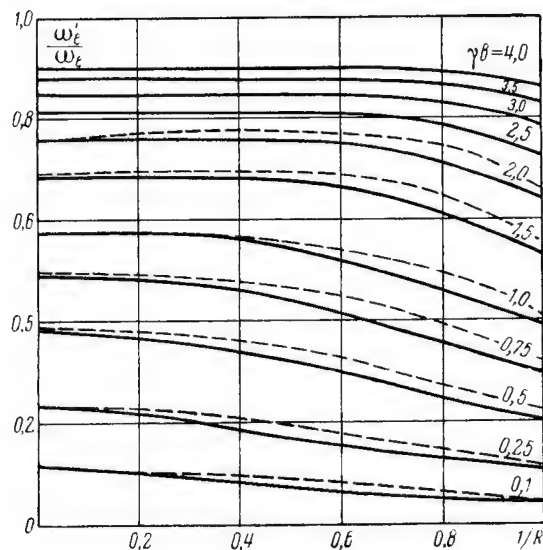
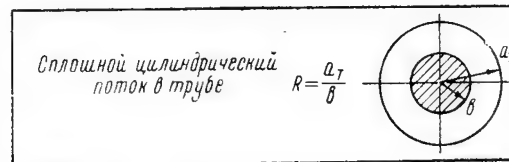


Рис. 6. Изменение коэффициента понижения частоты плазмы в зависимости от отношения радиусов пролетной трубы и электронного луча при различных значениях γb .

Значительно проще, но зато и менее строго, исследование процесса группирования в пролетном клистроне с учетом влияния экрана произвели Я. М. Эрдеи [9] и Ю. А. Кацман [10]. Свои исследования они основывали на теории бесконечно широкого потока и предположении, что при наличии сильного аксиального магнитного поля, обеспечивающего движение электронов только по траекториям, параллельным оси потока, распределение

продольной слагающей переменного электрического поля по радиусу потока в цилиндрической трубе можно выразить в виде

$$E_z(r) = J_0(Tr) E_{z_0}, \quad (17)$$

где

E_{z_0} — продольная слагающая переменного электрического поля на оси, по величине равная переменному полю при бесконечно большом диаметре потока,

T — коэффициент, определяемый из уравнения (14).

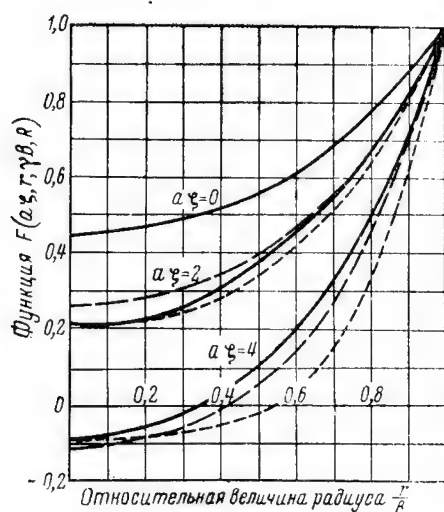


Рис. 7. Функции F_1 (штриховые линии), F_2 (пунктирные линии) и F_3 (сплошные линии) для случая, когда $\gamma b = 2$, $R = 1$ и зазор входного резонатора не имеет сеток.

Вследствие различия путей исследования эти авторы получили и различные результаты.

По исследованиям Я. М. Эрдеи продольное разгруппирование электронов при бессеточном зазоре в зависимости от их радиального положения определяется функцией

$$F_2 = \frac{\sin hl \sqrt{J_0(Tr)}}{hl \sqrt{J_0(Tr)}} \frac{I_0(\gamma r)}{I_0(R\gamma b)}, \quad (18)$$

по расчетам же Ю. А. Кацмана функцией

$$F_3 = \left[1 - J_0(Tr) + J_0(Tr) \frac{\sin a_z^*}{a_z^*} \right] \frac{I_0(\gamma r)}{I_0(R\gamma b)}. \quad (19)$$

Для сравнения обе эти функции приведены на рис. 7 для того же частного случая, для которого показана функция Финберга. При $\alpha z = 0$ все три функции определяются отношением $\frac{I_0(\gamma b)}{I_0(R\gamma b)}$, характеризующим изменение коэффициента взаимодействия луча с полем резонатора в случае бессточного зазора.

Расхождение между функцией Финберга и двумя остальными функциями при $\frac{r}{b} \approx 0$ объясняется тем, что последние не учитывают понижение частоты плазмы на оси луча за счет его конечных размеров и влияния экрана. Поэтому при $\gamma b \sim 2$ и $R \gg 1$, когда указанные эффекты невелики, все три функции одинаково могут быть использованы для расчетов группирования в пределах $\alpha z = 3 \div 3,5$ и $\alpha z = 3,5 \div 4$.

Очевидно, при меньших значениях γb функция Финберга будет более правильно отражать физический смысл происходящих явлений, чем две другие функции, которые переоценивают влияние экрана и, следовательно, неравномерность группирования электронов в зависимости от их радиального положения.

Переходя далее к определению переменного тока, заметим, что выражение, подобное (1), в данном случае можно написать лишь для переменной плотности тока (предполагается, что j_0 одинакова по всему сечению)

$$j_{m_n} = 2j_0 J_n(n\alpha z F), \quad (20)$$

где под F — понимается одна из функций, приведенных на рис. 7.

Для того, чтобы определить величину переменного тока, необходимо вычислить определенный интеграл

$$i_{m_n} = \frac{4i_0}{b^2} \int_0^b J_n(n\alpha z F) r dr, \quad (21)$$

где

$$i_0 = \pi b^2 j_0.$$

Графики, рассчитанные при помощи выражений (1) и (21) (при этом использовалась функция F_3) и приведенные на рис. 8, позволяют наглядно представить и оценить влияние экрана на различные гармоники переменного тока. Из рисунка видно, что влияние экрана не только сдвигает максимумы гармоник в сторону меньших параметров группирования, но и, как следовало ожидать, уменьшает их величину, что особенно заметно на гармониках высшего порядка.

Вследствие неравномерности продольного расталкивания электронов в зависимости от их радиального положения, параметр группирования $\alpha z F$ может меняться в пределах, превосходящих область первого максимума $J_n(n\alpha z F)$, тогда значительная часть луча не только не будет увеличивать среднее значение переменного тока, но даже понижать его.

С увеличением номера гармоники небольшие колебания параметра группирования резко изменяют величину переменного тока, поэтому рассмотрение вопроса о влиянии экрана на группирование электронов приобретает особенно важное значение в умножительных клистродах. Изучение этого явления, как и всякого

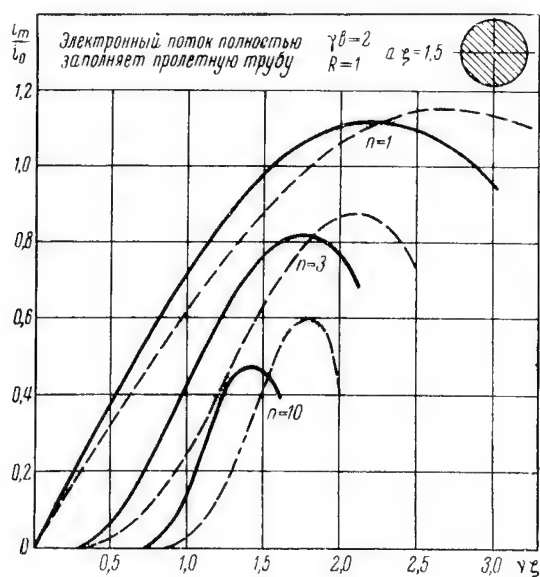


Рис. 8. Графики амплитуд тока различных гармоник, вычисленные при помощи выражений (1) (штриховые линии) и (21) (сплошные линии) для случая, когда зазор выходного резонатора образован сетками и луч полностью заполняет трубу.

другого, позволяет определить не только характер влияния его на происходящие в лампах процессы, но также и пути его практического применения. Так, например, являясь одной из основных причин понижения к.п.д. умножительных клистронов, влияние экрана может быть использовано для повышения мощности этих приборов [11]. Это связано с тем, что вблизи экрана силы продольного расталкивания даже при больших плотностях тока сильно понижаются. Поэтому при использовании полого (или трубчатого) электронного потока, вплотную прилегающего к экрану, через пролетную трубу можно пропустить значительно больший ток, не ухудшая процесса группирования.

Для подтверждения сказанного на рис. 9, 10 и 11 приведены кривые зависимости переменной слагающей тока десятой гармоники от параметра группирования, рассчитанные при помощи выражения (21) для различных сечений луча.

Из сравнения кривых видно, что с уменьшением толщины долого луча повышается относительная амплитуда переменного тока при больших значениях $a\zeta$. Например, если в первом слу-

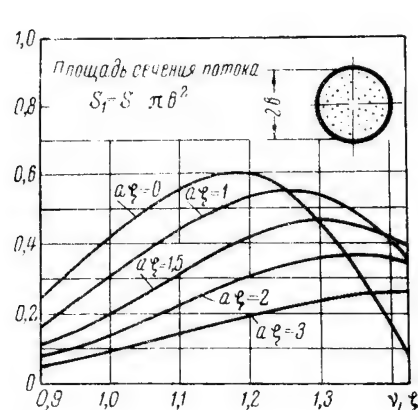


Рис. 9. Графики амплитуд тока десятой гармоники, вычисленные при помощи выражения (21) для $S_1 = S = \pi b^2$.

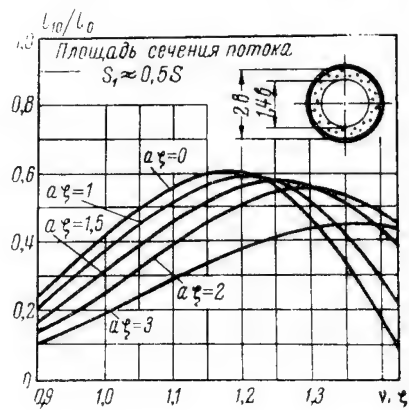


Рис. 10. Графики амплитуд тока десятой гармоники, вычисленные при помощи выражения (21) для $S_1 \approx 0.5S$.

чае (рис. 9) величина $\frac{i_{10}}{i_0} \approx 0.55$ имеет место при $a\zeta \approx 1$, то во втором случае (рис. 10) эта амплитуда достигается при $a\zeta \approx 2$ и

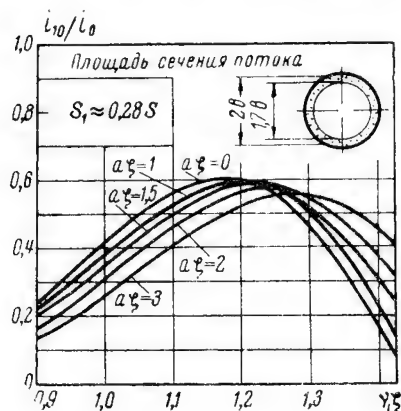


Рис. 11. Графики амплитуд тока десятой гармоники, вычисленные при помощи выражения (21) для $S_1 \approx 0.28S$.

в третьем (рис. 11) — при $a\zeta \approx 3$; всюду оптимальный параметр группирования не превосходит $\zeta \approx 1.3$. Если предположить, что увеличение $a\zeta$ происходит только за счет повышения плотности тока j_0 , то, несмотря на уменьшение площади сечения потока, ток i_0 может быть увеличен во втором случае в 2 раза и в третьем — в 2.5 раза.

Таким образом, использование в клистродах тонкостенных полых потоков, вплотную прилегающих к стенке пролетной трубы, позволяет: во-первых, получить значительно большую выходную мощность,

Очевидно, что преимущества полого потока еще больше возрастают, если он проходит в пространстве между двумя концентрическими трубами.

Заключение

Приведенный анализ различных методов расчета клистронов показывает, что границы применения теории бесконечно широкого луча определяются не только размерами луча, но также и плотностью тока в нем. Эта теория может быть использована для расчета переменного тока основной гармоник (с достаточной для инженерной практики точностью) при условии, что

$$\gamma b > 2 \text{ и } a_z^2 \leq \frac{\pi}{2}.$$

Если выполняется лишь первое неравенство, необходимо учитывать влияние экрана, причем можно считать, что на оси электронного потока группирование происходит так же, как в бесконечно широком луче. При выполнении только второго условия необходимо учитывать влияние конечного диаметра луча; влиянием же экрана можно пренебречь. При расчете высших гармонических составляющих тока учет влияния экрана, как правило, необходим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Кацман, Уравнение колебаний однородного электронного потока. ЖТФ, т. XXII, вып. 9, 1952.
2. Клинтроны. Изд-во „Советское радио“, 1952.
3. Weinstein M. and H. M. Von Foerster. Space Charge Effects in Dense velocity — Modulated Electron Beams. Journ. Appl. Phys. v. 27, № 4, pp. 344—346, 1956.
4. Hahn W. C. Small Signal Theory of Velocity — Modulated Electron Beams. GER, v. 42, № 6, 1939.
5. Ramo S. The Electronic — Wave Theory of Velocity Modulated Tubes. Proc IRE, v 27, № 12, 1939.
6. Branch G. and Mihran T. Plasma Frequency Reduction Factors in Electron Beams, Trans. IRE on ED, v. ED—2, April, № 2, p. p. 3—11, 1955.
7. Feenberg E. Notes on Velocity — Modulation. Sperry Gyroscope Company Report, № 5221—1043, 1945.
8. Chodorow M., Ginzton E. L., Nalos E. J., Debunching of Electron Beams Constrained by Strong Magnetic Fields. Proc IRE, № 8, 1953.
9. Я. М. Эрдейи, Исследование процесса группирования в пролетном клистроне с учетом влияния экрана. Канд. дисс., ЛЭТИ, 1954.
10. Ю. А. Кацман, Вопросы многорезонаторных клистронов. Отчет по научно-исследовательской работе ЛЭТИ, ч. 1. 1955.
11. А. Д. Сушков, Исследование процессов в умножительных клистропах, Канд. дисс., ЛЭТИ, 1955.

Канд. техн. наук, доц. Э. Н. ГОТОВАНЦЕВСКАЯ

О ФОРМИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПАКЕТОВ

В настоящей статье обсуждаются некоторые свойства когерентно излучающих электронных пакетов, условия их формирования с помощью бегущей волны, отсечки тока в диоде и возбужденного резонатора при релятивистских скоростях электронного потока.

Когерентность излучения

Ряд рассмотренных в литературе методов генерирования микрорадиоволн [1,2] связан с излучением электромагнитной энергии электронными пакетами большой плотности, малых размеров по сравнению с длиной генерируемой волны для когерентности излучения. Так, при движении в направлении одной из координатных осей пакета электронов со скоростью v_z соотношение

$$d/v_z < T/2$$

приблизительно может явиться условием когерентного излучения пакетом волн длин

$$\lambda = v_\phi T,$$

где

d — размер пакета в направлении движения,

T — период электромагнитных колебаний,

v_ϕ — фазовая скорость волн в пространстве взаимодействия.

Размеры пакета в направлениях, перпендикулярных движению, следует считать также малыми сравнительно с длиной волны.

При когерентном излучении полагают, что мощность излучения растет пропорционально квадрату числа электронов, содержащихся в пакете.

Для уточнения некоторых свойств когерентного излучения можно принять, что элементарные слои движущегося пакета электронов наводят токи в колебательных элементах пространства взаимодействия. Это явление легко можно представить для пространства, построенного на основе резонансных систем, создающих в целом искусственный диэлектрик, обладающий скоростью распространения электромагнитных волн v_ϕ , с которым взаимо-

действует электронный поток. Эти представления о наведенных токах могут быть распространены на все виды взаимодействующих пространств, так как для распространяющихся электромагнитных волн пространства обладают определенным значением характеристического сопротивления.

Результирующий наведенный ток, квадрат которого пропорционален переданной энергии в колебательный элемент пространства, может быть определен по теореме о наведенном токе, записываемой для однонаправленного электронного потока в виде

$$i_n = \frac{1}{d} \int_0^d \sum_{k=1}^{\infty} i_k e^{jk\Omega \left(t - \frac{x}{v_g}\right)} dx = \sum_{k=1}^{\infty} i_k \frac{\sin \frac{k\Omega d}{2v_g}}{\frac{k\Omega d}{2v_g}} e^{j \left(k\Omega t - \frac{k\Omega d}{2v_g}\right)}, \quad (1)$$

$$i_k = \frac{\Omega}{\pi} \int_0^{T_n} f(t) e^{-jk\Omega t} dt, \quad (2)$$

здесь

i_k — амплитуда k -той излученной гармоники;

$T_n = \frac{2\pi}{\Omega}$ — период пакетирующего напряжения;

$f(t)$ — функция, определяющая форму пакета.

Например, для пакета прямоугольной формы длительностью

$\tau = \frac{d}{v_g}$ и амплитудой $I = \frac{ev_g n}{d}$ величина i_k будет равна

$$i_k = \frac{2ev_g n}{k\pi d} \sin \frac{k\Omega \tau}{2}, \quad (3)$$

$$i_{k \max} = \frac{2ev_g n}{k\pi d} \quad \text{при} \quad \tau = \frac{d}{v_g} = \frac{T_n}{2k},$$

где

n — число электронов в пакете в виде куба со стороной d ;

$k\Omega$ — круговая частота излученной гармоники.

Величина

$$\beta = \frac{\sin \frac{k\Omega d}{2v_g}}{\frac{k\Omega d}{2v_g}} \quad (4)$$

является мерой отклонения от полной когерентности излучения. Вид функции β , однако, может быть иным при изменении формы пакета и зависимости скорости v_g от координаты; он может быть определен путем аналогичных вычислений наведенного тока с учетом особенностей пакета.

Последовательно продолжая подобную трактовку, для функции, отдаваемой элементу пространства мощности, по аналогии с резонатором, можно записать:

$$P_{\sim} = \frac{i_k^2}{2} g_0^2 \frac{g_0}{(g_0 + g_s)^2 + (b_0 + b_s)^2}. \quad (5)$$

Здесь

g_0 и b_0 — активная и реактивная волновые проводимости пространства взаимодействия;

g_s и b_s — активная и реактивная проводимости электронного пакета.

Для излучающего пакета при его равномерном движении вид величин g_s и b_s будет совпадать с известным выражением, определенным в теории кистронов. Например, для g_s можно записать [3]

$$g_s = \frac{I_0}{2U_0} \frac{\sin \frac{k\Omega d}{2v_s}}{\frac{k\Omega d}{2v_s}} \left[\frac{\sin \frac{k\Omega d}{2v_s}}{\frac{k\Omega d}{2v_s}} + \cos \frac{k\Omega d}{2v_s} \right] \quad (6)$$

при другом характере движения и формах пакета соответствующие величины g_s и b_s могут быть найдены с помощью разработанных методов в теории электронных СВЧ приборов.

При взаимодействии потоков реальных плотностей с известными искусственными или естественными средами имеет место условие

$$g_0 \sim g_s, \quad g_0 \sim b_s^{-1} \sim b_0.$$

Кроме того, можно считать, что пространство имеет параметры, позволяющие удовлетворить соотношению $b_s = -b_0$.

При этих условиях мощность, отдаваемая пакетом, будет расти пропорционально квадрату числа n в соответствии с видом функции P

$$P_{\sim} = \left| \frac{2ev_s n}{k\pi d} \sin \frac{k\Omega d}{2v_s} \right|^2 \frac{g_0^2}{2} \frac{1}{g_0}. \quad (7)$$

Величина g_s будет расти пропорционально первой степени n , снижая скорость нарастания мощности.

Вышеприведенное уточнение условий когерентности снимает могущее возникнуть противоречие, по которому при некотором значении n к. н. д. излучения может стать больше единицы, если для любых n принимать, что переменная мощность $P_{\sim} = k_1 n^2$, а подводимая постоянная мощность $P_0 = k_2 n$.

Известно также положение, при котором когерентное излучение имеет место для разных пакетов, находящихся в пространстве на расстояниях

$$D = k \frac{\lambda_0}{2},$$

где k -целые числа.

В рамках изложенных представлений о согласовании проводимостей это явление соответствует синхронному включению ряда параллельных генераторов тока. Благодаря выбранным условиям трансформации величина поля и электронная проводимость пакета g_e возрастает в n раз и явление имеет характер, аналогичный непосредственному росту числа электронов в пакете. Этот вид когерентности не требует роста тока в области пространства, ограниченной размерами, меньшими длины волны, приводящими к принципиальным трудностям при создании электронно-оптических систем с последующей фокусировкой. Здесь мы приходим к целесообразности построения пространственных искусственных или естественных взаимодействующих систем, которые должны обеспечить более высокий к. п. д. по сравнению с единичными потоками, взаимодействующими с линейными замедляющими системами.

Оценка числа электронов в пакете и длительности его существования

Переходя к вопросам формирования пакетов, можно представить по крайней мере три основных принципа:

1. Пакетирование вариацией скорости электронного потока в резонаторе с последующим группированием.
2. Пакетирование вариацией скорости в бегущей волне напряженности электрического поля с одновременным группированием.
3. Пакетирование отсечкой тока в диоде.

Эти три принципа могут комбинироваться при построении реальных систем, дополняя своими положительными особенностями общую конструктивную схему системы.

При формировании пакетов возникает два основных вопроса: 1) определение возможного числа электронов в пакете заданного размера, 2) определение длительности существования пакета без существенного изменения его геометрии.

Наряду с этим, для построения системы с технически реальными параметрами необходимо определение: величин мощности для формирования и поддержания пакетов, допустимых напряженностей электрического поля в системе, плотности токов в электронных пучках, частот, используемых для пакетирования колебаний, и геометрических размеров элементов системы.

Связь между перечисленными параметрами обуславливается принятой системой пакетирования.

Оценку числа электронов в плоском пакете можно выполнить, рассматривая область между плоскими электродами (рис. 1), находящимися под постоянным потенциалом U_0 , в центре которой сформирован пакет размером d метров.

Решение уравнения Пуассона с учетом условий на границе [4] пакета приводит к формуле максимальной плотности тока вида

$$J_m = 4,66 \cdot 10^{-6} F \left(p_1 \frac{2d}{d} \right) \frac{U_0^{3/2}}{ad} [a \text{ м}^2], \quad (8)$$

где

$$p = \left(\frac{U_{\min}}{U_d} \right)^{1/2}.$$

Для значений $\alpha = a/d > 1$ можно принять $p = 0,7$ и $F = 1,3$.

С другой стороны, J_m может быть выражена через потенциал в плоскости на расстоянии x от середины пакета в виде

$$J_m = \frac{2,33 \cdot 10^{-6} U_x^{3/2}}{x^2} (1 + 3p_x - 4p_x^3). \quad (9)$$

Величина p_x меняется от 0,7 до 1 при изменении x от $d/2$ до 0. Приблизительно, принимая среднее значение для $p_x = 0,85$,

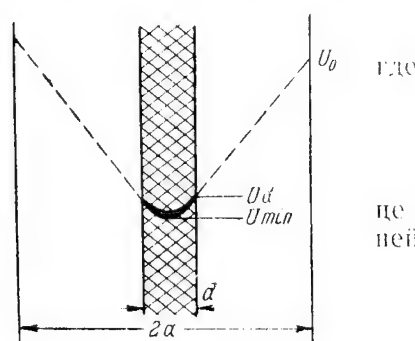


Рис. 1.

$$J_m = A \frac{U_x^{3/2}}{x^2},$$

где

$$A = \frac{2,33 \cdot 10^{-6}}{6^3 \cdot 10^{15}}.$$

Для числа электронов в единице объема на расстоянии от средней плоскости можно записать

$$N(x) = \frac{J_m}{ev(x)}. \quad (10)$$

Число электронов в пакете n можно получить, суммируя слои с различной плотностью

$$n = 2d^2 \int_0^{d/2} \frac{J_m}{2v(x)} dx = 2d^2 \int_0^{d/2} \frac{J_m A^{1/3}}{ex^{2/3}} dx. \quad (11)$$

После вычислений и подстановки J_m из выражения (8) получается

$$n = 2 \cdot 10^8 \frac{U_0 d}{\alpha^{2/3}}. \quad (12)$$

Из формулы (12) следует, что число электронов в пакете n , в виде куба со стороной d , пропорционально ускоряющему потенциалу U_0 и размеру d .

Размер a , а следовательно, и отношение α при формировании пакета группированием убывают с ростом частоты источника возбуждения резонатора. Полученное выражение (12) может быть использовано при определении максимального числа электронов в пакете в первом приближении. Более точные расчеты возможны лишь для определенных условий пакетирования.

Оценку длительности существования плоского пакета при движении его в пространстве, свободном от внешнего поля, можно провести на основе определения приращения его протяженности под действием сил расталкивания.

Принимая, что на граничные электроны пакета действует постоянная сила

$$F = Ec = \frac{\sigma}{\epsilon_0} e, \quad (13)$$

где

E — напряженность электрического поля, в м;

e — заряд электрона в кулонах;

σ — поверхностная плотность заряда, к/м²;

ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума, ф/м²,

получим, что ускорение граничного слоя может быть записано в виде

$$a = \frac{2\Delta d}{\tau^2}, \quad (14)$$

где τ — время движения.

Далее,

$$m \frac{2\Delta d}{\tau^2} = \frac{e\sigma}{\epsilon_0}, \quad (15)$$

где m — масса электрона, или

$$\Delta d = 16 \cdot 10^2 \frac{n}{d^2} \tau^2, \quad (16)$$

где

Δd и d — размеры в метрах;

τ — время в секундах;

n — число электронов в кубе со стороной d .

Из соотношения (16) видно, что приращение ширины Δd пропорционально числу электронов пакета n и квадрату времени его движения в свободном пространстве, т. е. при равномерном движении — квадрату пройденного пути. Абсолютное значение пути пробега пакета для равных приращений пропорционально скорости его движения.

Пакет электронов в поле бегущей волны

Поддержание размеров пакета может быть осуществлено при нейтрализации сил расталкивания полем бегущей волны. Эти условия при равенстве $v_{\phi} = v_e$ можно записать для плоского пакета в виде*

$$E \sin \frac{\omega}{v_{\phi}} d = \frac{\tau}{\epsilon_0} = \frac{en}{\epsilon_0 d^2}, \quad (17)$$

Для узких пакетов, при замене синуса аргументом,

$$n = 10^{17} \frac{Ed^3}{\lambda v_e}, \quad (18)$$

где

λ — длина волны в свободном пространстве в метрах;

v_e — скорость электронов, $м сек := v_{\phi}$,

d — размер пакета в метрах;

E — напряженность поля, в $м$.

При этом мощность бегущей волны в периодической структуре, подводимая от источника, может быть определена из известного соотношения

$$P = \frac{E^2}{2z_n} \left(\frac{v_e}{\omega} \right)^2 [вт]; \quad (19)$$

здесь z_n — характеристическое сопротивление структуры, имеет порядок $100 ом$. Мощность в периодической структуре будет расти обратно пропорционально шестой степени ширины пакета и прямо пропорционально второй степени n . Например, применяя (18) и (19), можно показать, что при $\lambda = 10^{-3} м$, $v_e = 18 \cdot 10^7 м сек$, $d = 5 \cdot 10^{-4} м$, $E = 2 \cdot 10^6 в м$, $z_n = 100 ом$ окажется возможным поддержать пакет при числе электронов $n = 1,5 \cdot 10^7$ и подводимой мощности $P = 20 квт$.

При рассмотрении условий поддержания пакета мы приняли, что пакет был сформирован уже на входе в периодическую структуру. Однако при соответствующей длине последней, входящий непрерывный поток электронов сформируется в пакет при движении в поле бегущей волны. Выражения (18) и (19) и в этом случае будут определять число электронов в пакете и мощность, подводимую к периодической структуре для формирования и поддержания размеров пакета.

Определение необходимой для пакетирования длины периодической структуры может быть выполнено для режима малого

*) Для пакета в виде шарика подобный метод оценки числа n был применен ранее аспирантом кафедры ЛЭТИ В. М. Николаевым.

переменного напряжения в периодической структуре по сравнению с постоянным $U_{\sim} \ll U_0$

$$U_{\sim} = \int_0^{\lambda_c/4} E \sin \frac{\Omega x}{v_{\phi}} dx = \frac{v_{\phi} E}{\Omega}, \quad (20)$$

где λ_c — длина волны в структуре.

Условия оптимальной группировки можно определить из равенства единице параметра группировки в структуре.

Из теории ЛБВ для параметра группировки известно выражение [6]

$$X = \frac{\Omega}{v_{\phi}} \frac{E e^{\Gamma l}}{2 U_0 (B^2 + \Gamma^2)}; \quad (21)$$

здесь

$$B = \frac{\Omega}{v_{\phi}} \left(\frac{v_{\phi}}{v_{\phi}} - 1 \right) \quad (22)$$

при условии оптимального взаимодействия волны с потоком электронов

$$\Gamma = \sqrt{3} B = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\Omega}{v_{\phi}} \left(\frac{I_0 z_{\phi}}{4 U_0} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (23)$$

где

I_0 — величина среднего тока.

При равенстве (21) единице, с учетом (19), (20) и (23), получится выражение для длины периодической структуры

$$l = \frac{1}{\sqrt{3} B} \ln \frac{8 U_0 B^2}{U_{\sim}} \frac{v_{\phi}^2}{\Omega^2} = \frac{1}{\sqrt{3} B} \ln \frac{8 U_0 B^2}{\sqrt{2 P_{z_{\phi}}}} \frac{v_{\phi}^2}{\Omega^2}. \quad (24)$$

Формирование отсечкой тока

Получение пакета электронов, вылетающего из отверстия в аноде, отсечкой тока в диоде связано с условиями эмиссии катода при сверхвысоких частотах [7].

Для тока эмиссии с площади катода, равной сечению пакета d^2 , можно записать

$$i = d^2 \frac{\epsilon_0}{d_{ак}} \frac{d U_a}{dt}; \quad (25)$$

здесь $d_{ак}$ — расстояние анод — катод.

$U_{a\sim} \sin \Omega t - U_{a0} = U_a$ — напряжение на аноде.

Эмиссия начинается в момент (t_0), перехода напряжения U_a через ноль и прекращается при $d U_a / dt = 0$, т. е. при

$$\Omega t = \frac{\pi}{2}.$$

В этих условиях заряд, эмитируемый за период

$$q = \frac{d^2}{\Omega} \int_{-\Omega t_0}^{\Omega t_0} \frac{\varepsilon_0}{d_{ak}} U_a \cos \Omega t d\Omega t = \frac{\varepsilon_0 d^2 U_a}{d_{ak}} (1 - \sin \Omega t_0) \quad (26)$$

для числа электронов в пакете $n = q/e$, получится

$$n = \frac{\varepsilon_0 d^2}{e d_{ak}} U_a (1 - \sin \Omega t_0), \quad (27)$$

принимая за фазовый интервал существования пакета

$$\Omega \tau = \frac{\pi}{2} - \Omega t_0.$$

Для малого угла $\Omega \tau$ выражение (27) преобразуется к виду

$$n = \frac{\varepsilon_0}{e} \frac{d^2}{d_{ak}} U_a \frac{(\Omega \tau)^2}{2}. \quad (28)$$

Расчет по формуле (28) показывает, что даже при предельных напряженностях поля $U_a/d_{ak} = 200 \text{ кВ/см}$ величина n оказывается малой для малых углов отсечки $\Omega \tau$. Так, для $d = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ и $\Omega \tau = 2 \cdot 10^{-2}$ $n = 5,5 \cdot 10^4$.

Таким образом, метод пакетирования отсечкой тока в диоде не эффективен при большом отношении излучаемой частоты к частоте пакетирования.

Формирование пакетов возбужденным резонатором

Как выше отмечалось, при пропускании потока быстрых электронов через зазор возбужденного резонатора, в последующем пролетном пространстве происходит формирование острокопечных импульсов электронного тока — электронных пакетов. (Явление, аналогичное группированию в клистродах).

Приближенный расчет формы пакета возможен на основе выражения для тока, полученного в теории клистронов [3], вида

$$I = I_0 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_k \left(k \Omega \tau_e \frac{v_{\infty}}{v_g} \frac{\sin \omega_e \tau_e}{\omega_e \tau_e} \right) \cos k (\Omega t - \Omega \tau_e) \right], \quad (29)$$

где

τ_e — время пролета, равное L/v_g ,

где L — расстояние от резонатора до точки наблюдения;

v_{∞} — амплитуда колебания скорости;

ω_e — параметр расталкивания (называемый частотой электронной плазмы), равный

$$\omega_e = \sqrt{\frac{e}{m \varepsilon_0} \frac{J_0}{v_g}}, \quad (30)$$

где

$j_0 = I_0/d^2$ — постоянная плотность тока.

Использование формулы (29) для определения соответствующей гармоники тока в клистронах сводится к расчету каждого члена ряда.

Для вычисления формы электронного пакета, правильно отражающей его размеры в области максимальной плотности электронного тока и минимальной протяженности, расчет по формуле (29) требует учета большого числа гармоник

$$k = \frac{2T_n}{T_u},$$

где

T_n — период пакетирующего источника;

T_u — период излучаемых пакетом колебаний.

Для выбора оптимальной формы пакета при этом необходимо неоднократно повторить расчет для разных параметров группирования. Таким образом, определение оптимального режима пакетирования на основе выражения (29) связано с весьма громоздкими вычислениями. Ввиду этого целесообразно определить режим пакетирования, обеспечивающий минимальную протяженность и максимальное число электронов в пакете на основе непосредственного исследования уравнения движения электронов с учетом пространственного заряда [5] вида

$$\frac{d^3x}{dt^3} = \frac{e}{m\epsilon_0} j_0 \quad (31)$$

при следующих начальных условиях при $t = t_0$: $\ddot{x} = 0$; $\dot{x} = v_g + v \sin \Omega t_0$; $x = 0$.

Интегрирование (31) с учетом (30) дает уравнение траектории электрона

$$\Omega \frac{x}{v_g} = -\frac{\omega_c^2}{\Omega^2} \frac{(\Omega t - \Omega t_0)^3}{6} + (\Omega t - \Omega t_0) \left(1 + \frac{v}{v_g} \sin \Omega t_0 \right), \quad (32)$$

где

$\Omega \frac{x}{v_g}$ — безразмерная координата;

t — текущее время;

t_0 — время вылета из резонатора.

Из пространственно-временных диаграмм, построенных по уравнению (32), могут быть определены: расстояние от резонатора до места образования пакета, плотность заряда в нем, его протяженность в пространстве и времени и длительность его пробега без существенных изменений размеров.

Максимальная необходимая мощность возбуждения резонатора может быть определена из выражения

$$P_{\sim} = U_{\sim}^2 \frac{g_p + g_g}{2}, \quad (33)$$

(если принять $U_{\infty} = U_0$);

здесь

$g_p = \frac{1}{Z_{\text{эк}}}$ — проводимость резонатора;
 $g_{\text{э}}$ — электронная активная проводимость, равная 3,

$$g_{\text{э}} = \frac{I_0}{2U_0} \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}} \left[\frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}} - \cos \frac{\theta}{2} \right], \quad (34)$$

(θ — угол пролета электронов в резонаторе). Обычно в условиях пакетирования соблюдается неравенство

$$g_{\text{э}} \ll g_p.$$

Величина среднего электронного тока может быть определена из выражения

$$I_0 = \frac{en}{\alpha T_n} = \frac{en\Omega}{2\pi\alpha}. \quad (35)$$

Коэффициент α определяет отношение числа электронов в пакете к общему числу электронов, прошедших резонатор за период T_n . Величина α может быть определена из пространственно-временных диаграмм. Приближенно можно считать, что в условиях пакетирования резонатором $\alpha = 0,1$.

Для решения задачи каскадного пакетирования двумя последовательно действующими на электронный поток возбужденными резонаторами, находящимися на некотором расстоянии один от другого, уравнение (31) должно быть интегрировано со следующими начальными условиями при $t = t_1$:

$$\ddot{x}(t_1) = \frac{e}{m\epsilon_0} j_0 (t_1 - t_0); \quad (36)$$

$$\dot{x}(t_1) = \frac{e}{m\epsilon_0} j_0 \frac{(t_1 - t_0)^2}{2} + v_{\text{э}} + v_{\text{э}1} \sin \Omega t_0 + \\ + v_{\text{э}2} \sin (\Omega t_1 + \varphi); \quad (37)$$

$$x(t_1) = \frac{e}{m\epsilon_0} j_0 \frac{(t_1 - t_0)^3}{6} + (v_{\text{э}} + v_{\text{э}1} \sin \Omega t_0) (t_1 - t_0); \quad (38)$$

здесь

t_1 — момент пролета и вылета электрона у второго резонатора (время пролета в резонаторе принимается малым);

t_0 — момент вылета электрона из первого резонатора;

$v_{\text{э}}$ — переменная скорость у первого резонатора;

$v_{\text{э}1}$ — переменная скорость у второго резонатора;

φ — разность фаз колебаний в резонаторах.

Отверстия в резонаторах для потока электронов при этом принимаются прозрачными.

Интегрирование (31) при условиях (36), (37) и (38) дает уравнение траектории электрона после второго резонатора

$$\Omega \frac{x}{v_s} = f(\Omega t_0; \Omega t)$$

в виде

$$\begin{aligned} \frac{\Omega x(t)}{v_s} = & -\frac{v_e^2}{\Omega^2} \left[\frac{(\Omega t - \Omega t_1)^3}{6} + \frac{(\Omega t_1 - \Omega t_0)^3}{6} + \right. \\ & \left. + \frac{(\Omega t - \Omega t_1)^2 (\Omega t_1 - \Omega t_0)}{2} + \frac{(\Omega t - \Omega t_0) (\Omega t_1 - \Omega t_0)^2}{2} \right] + \\ & + \left[1 + \frac{v_{e1}}{v_s} \sin \Omega t_0 + \frac{v_{e2}}{v_s} \sin (\Omega t_1 + \varphi) \right] (\Omega t - \Omega t_1) + \\ & + \left[1 + \frac{v_{e1}}{v_s} \sin \Omega t_0 \right] (\Omega t_1 - \Omega t_0). \end{aligned} \quad (39)$$

Выражение (39) определяет зависимость безразмерной координаты $\Omega \frac{x}{v_s}$ от моментов времени t_0 и t . Момент t_1 не является независимым и может быть определен из соотношения (38) для определенного расстояния между резонаторами x_1 как функция t_0 .

Исследование траектории (39) может выявить свойства и условия каскадного группирования.

Следует отметить, что так как формирование пакетов с помощью одиночного резонатора уже приводит к образованию пакетов минимальной протяженности и максимальной плотности (что соответствует условию $dt/dt_0 = 0$), то нет оснований ожидать значительного выигрыша от каскадного группирования.

Выводы

1. Рассмотрение эффективности когерентного излучения в связи с условиями согласования проводимости электронного пакета с проводимостью пространства взаимодействия объясняет целесообразность использования пространственных замедляющих систем для повышения к. п. д. излучения.

2. Сравнительная оценка методов пакетирования показывает, что система с бегущей волной обеспечивает получение пакетов с длительным пробегом, однако требует больших мощностей для возбуждения периодической структуры по сравнению с мощностью возбуждения одиночного пакетизирующего резонатора. Система с отсечкой тока в диоде использует лишь малый интервал фаз пакетизирующего напряжения и позволяет получить пакет лишь с малым числом электронов по сравнению с двумя вышеотмеченными методами.

3. Максимальное число электронов в пакете пропорционально величине ускоряющего напряжения и размеру пакета. Длина про-

бега пакета в свободном пространстве без внешнего электромагнитного поля обратно пропорциональна корню квадратному из числа электронов в нем и прямо пропорциональна размеру.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. К. И. Крылов, Разработка метода получения сантиметровых и миллиметровых волн, отчет, ЛЭТИ, 1936.
 2. В. Л. Гинзбург, Об изучении микрорадиоволн и их поглощение в воздухе, Известия АН СССР, Серия физическая, XI, № 2, 1947.
 3. Клинтроны, Перевод с английского под редакцией Е. Д. Науменко, Изд. „Советское радио“, 1952.
 4. Beck, Thermionic Valves Their, Theory and Design.
 5. Ф. Б. Левеллин, Инерция электронов, Гостехиздат, 1946.
 6. В. Ф. Коваленко, Введение в электронику сверхвысоких частот, Изд. „Советское Радио“, 1952.
 7. М. С. Нейман, Триодные и тетродные генераторы сверхвысоких частот, Изд. „Советское радио“, 1950.
-

Аспирант В. М. НИКОЛАЕВ

О МОДУЛЯЦИИ ПО СКОРОСТИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЗАЗОРЕ РЕЗОНАТОРА ПРИ БОЛЬШИХ СИГНАЛАХ

При релятивистских скоростях величина массы электрона является функцией его кинетической энергии. Это приводит к нарушению классического соотношения между скоростью и кинетической энергией частицы и Ньютонова уравнения движения, которые заменяются соответствующими выражениями релятивистской механики.

Соотношения, определяющие скорость электронов, прошедших высокочастотный зазор резонатора, выведенные в соответствии с законами классической механики, приводят к значительной погрешности и должны быть пересмотрены.

Вопросы скоростной модуляции релятивистских электронов рассматриваются в работе Ходорова, Гинзтона и др. [1] и в работе Зусмановского и Хоплановой [2]. Авторы обеих работ приходят к следующему выражению, определяющему скорость электрона на выходе из высокочастотного зазора:

$$v = v_0 \left(1 + \nu \frac{U_1}{2U_0} M \sin \omega t \right), \quad (1)$$

где

v — скорость электронов на выходе из высокочастотного зазора;

v_0 — постоянная скорость электрона;

U_1 — амплитуда напряжения на щели резонатора;

U_0 — постоянное ускоряющее напряжение;

M — коэффициент электронного взаимодействия для плоского зазора, равный $\frac{\sin \xi_{щ/2}}{\xi_{щ/2}}$, где, в свою очередь, $\xi_{щ} = \frac{\omega l_{щ}}{v_0}$ —

угол пролета в высокочастотном зазоре при постоянной скорости и $l_{щ}$ — длина высокочастотного зазора;

ω — угловая частота;

t — время;

ν — релятивистская поправка.

$$\nu = \frac{2}{R(R+1)} = \frac{1}{1 + \frac{3}{2} \frac{eU_0}{m_0 c^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{eU_0}{m_0 c^2} \right)^2} \quad (2)$$

$$R = \frac{1}{1 - \beta_0^2}, \quad (2')$$

где

e — заряд электрона;
 m_0 — масса покоя электрона;
 c — скорость света;

$$\beta_0 = \frac{v_0}{c}.$$

Выражение (1) отличается от своего нерелятивистского аналога только поправочным множителем γ . При нерелятивистских скоростях $\gamma = 1$.

В ряде случаев при расчете группирования приходится иметь дело с величиной приращения скорости (v_{\sim}) и величиной, обратной полной скорости электрона на выходе из высокочастотного зазора ($\frac{1}{v}$). Используя выражение (1), определим указанные величины соответственно как

$$v_{\sim} = \gamma \frac{U_1}{2U} M \sin \omega t, \quad (3)$$

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{v_0} \left(1 - \gamma \frac{U_1}{2U_2} M \sin \omega t \right). \quad (4)$$

Формулы (1), (3), (4) из-за нелинейной зависимости между энергией и скоростью электрона строго справедливы лишь в случае малого коэффициента модуляции α ($\alpha = \frac{U_1}{U_0} \ll 1$). На практике, однако, выражения (1), (3), (4) используются при коэффициентах модуляции α , сравнимых с единицей.

Целью настоящей статьи является:

- 1) оценка погрешности при использовании указанных формул и определение пределов их применения,
- 2) выяснение зависимости погрешности расчетов от величины постоянной скорости электронов,
- 3) получение некоторых соотношений для расчета v , v_{\sim} и $\frac{1}{v}$ при релятивистских скоростях в случае больших коэффициентов модуляции, когда формулы (1), (3), (4) приводят к значительным погрешностям.

Первоначально мы рассмотрим случай весьма малых углов пролета в щели резонатора, когда $\xi_{\text{ш}} \simeq 0$ и $M \simeq 1$, а затем перейдем к случаю конечных углов пролета.

1. Случай весьма малых углов пролета

С помощью известного релятивистского соотношения между скоростью электрона и его кинетической энергией

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{eU}{m_0 c^2}\right)^2}} \quad (5)$$

была рассчитана максимальная относительная погрешность при использовании соотношений (1), (3), (4) с учетом релятивистской поправки γ при напряжениях $U_0 = 100 \text{ кВ}$ и 400 кВ и различных коэффициентах модуляции α . Предполагалось, что величина кинетической энергии электрона, проходящего высокочастотный зазор, изменяется по закону

$$eU = eU_0 (1 + \alpha \sin \omega t). \quad (6)$$

Результаты расчетов графически показаны на рисунках 1, 2, 3. Там же приведены кривые максимальной относительной погрешности для нерелятивистского случая.

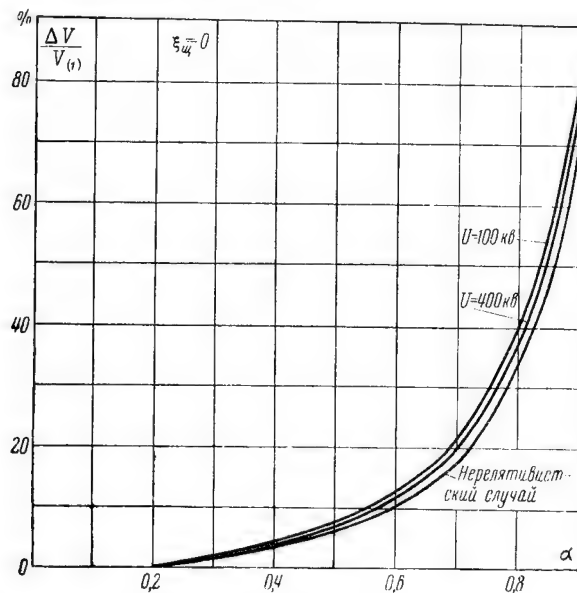


Рис. 1. Зависимость максимальной относительной погрешности при расчете полной скорости от коэффициента модуляции α в случае весьма малого угла пролета

$\frac{\Delta v}{v_{(1)}}$ — максимальная относительная погрешность формулы (1).

Рассматривая графики, видим, что, не совершая ошибки большей 10% , при ускоряющем напряжении $U_0 = 400 \text{ кВ}$ формулами (1) и (4) можно пользоваться вплоть до коэффициентов модуляции $\alpha = 0,55$.

При ускоряющем напряжении $U_0 = 100 \text{ кВ}$ погрешность расчета полной скорости электрона также достигает 10% при $\alpha \approx 0,55$, в то время как десятипроцентная погрешность величины, обратной скорости электронов, наблюдается уже при $\alpha = 0,5$. Погрешность расчета приращения скорости по формуле (3) для $\alpha = 0,2$

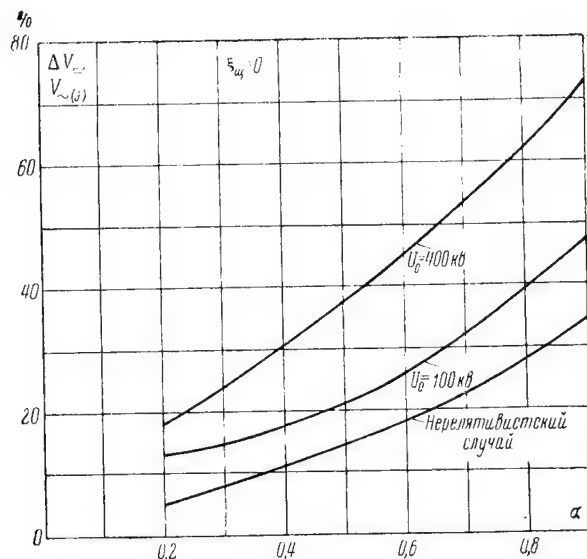


Рис. 2. Зависимость максимальной относительной погрешности при расчете приращения скорости от коэффициента модуляции α в случае весьма малого угла пролета

$\frac{\Delta v}{v_{(3)}}$ — максимальная относительная погрешность формулы (3).

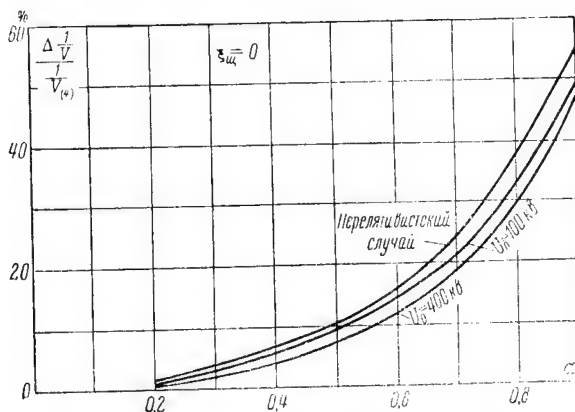


Рис. 3. Зависимость максимальной относительной погрешности при расчете величины обратной скорости от коэффициента модуляции α в случае весьма малого угла пролета

$\frac{\Delta \frac{1}{v}}{\frac{1}{v_{(4)}}}$ — максимальная относительная погрешность формулы (4).

оказывается равной 10% при $U_0 = 100 \text{ кВ}$ и составляет 20% при $U_0 = 400 \text{ кВ}$.

Сравнение кривых погрешностей для различных ускоряющих напряжений показывает, что величина относительной погрешности при определении полной скорости электрона v сначала растет с ростом ускоряющего напряжения U_0 , а затем несколько уменьшается, оставаясь, однако, при $U_0 = 400 \text{ кВ}$ большей, чем в нерелятивистском случае.

Значительное увеличение погрешности в релятивистской области наблюдается при определении приращения скорости по формуле (3). Величина погрешности растет с ростом ускоряющего напряжения.

Погрешность величины обратной скорости уменьшается с ростом ускоряющего напряжения U_0 .

Первоначальный рост погрешности расчета полной скорости электрона связан с „большей нелинейностью“ зависимости скорости электрона от его энергии в релятивистской области. Последующее уменьшение погрешности с ростом U_0 объясняется уменьшением относительной вариации скорости электрона с увеличением ускоряющего напряжения.

При определении приращения скорости по формуле (3) оба вышеуказанных фактора приводят к значительному росту погрешности расчета. Уменьшение приращения скорости с ростом ускоряющего напряжения приводит к тому, что максимальная погрешность формулы (3) имеет место при максимальном ускоряющем напряжении на щели резонатора. При расчете полной скорости электрона (при $\alpha > 0,2$) и обратной ей величины по формулам (1) и (4) максимальная погрешность наблюдается при тормозящем напряжении на высокочастотном зазоре. Уменьшение погрешности формулы (4) в релятивистском случае объясняется вторым фактором.

Для точных расчетов в случае больших значений коэффициента модуляции приходится использовать выражение (5). Последнее можно представить в виде степенного ряда и применять для приближенных расчетов, удерживая соответствующее число членов. Указанное разложение получается непосредственно из (5) при учете (2') и (6) и использовании биномиальных рядов. Оно имеет вид

$$v = v_0 \left[1 + \frac{1}{2} A \alpha \sin \omega t - \frac{1}{2} \frac{1}{4} B \alpha^2 \sin^2 \omega t + \frac{1 \cdot 1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6} C \alpha^3 \sin^3 \omega t - \right. \\ \left. - \frac{1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8} D \alpha^4 \sin^4 \omega t + \dots \right], \quad (7)$$

где

$$A = \frac{2}{R(R+1)},$$

$$B = \frac{4(3R^2 - 2)}{(R+1)^2 R^2},$$

$$C = \frac{8(4R^4 - 5R^2 + 2)}{R^3(R+1)^3},$$

$$D = \frac{16(20R^6 - 35R^4 + 28R^2 - 8)}{R^4(R+1)^4}.$$

В случае малых углов пролета выражение (1) может быть получено из (7) при пренебрежении всеми членами разложения кроме двух первых. При нерелятивистских скоростях коэффициенты $A, B, C, D \dots$ оказываются равными единице и разложение (7) переходит в обычный биномиальный ряд, соответствующий нерелятивистскому соотношению

$$v = v_0 \sqrt{1 + \alpha \sin \omega t}. \quad (8)$$

2. Случай конечных углов пролета

При расчете скоростной модуляции в реальных конструкциях приходится учитывать конечность времени пролета электрона в высокочастотном зазоре.

В случае релятивистского электронного потока соображения электрической прочности являются решающими для выбора ширины щели объемного резонатора. На практике выбранная длина высокочастотного зазора часто соответствует углу пролета, равному $\frac{\pi}{2}$ радиан.

При выводе формулы, определяющей скорость электрона, прошедшего высокочастотный зазор, будем исходить из релятивистского уравнения движения

$$\frac{m_0}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}} \frac{dv}{dt} = \frac{eU_1}{l_m} \sin \omega t. \quad (9)$$

Интегрируя (9) и учитывая (2'), будем иметь

$$\frac{m_0 v}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}} - m_0 v R = - \frac{eU_1}{\omega l_m} (\cos \omega t_0 - \cos \omega t) \quad (10)$$

и

$$v = \frac{c \left[m v_0 R + \frac{eU_1}{\omega l_m} (\cos \omega t_0 - \cos \omega t) \right]}{\left\{ m_0^2 c^2 + \left[m_0 v_0 R + \frac{eU_1}{\omega l_m} (\cos \omega t_0 - \cos \omega t) \right]^2 \right\}^{1/2}},$$

где

t_0 — время входа электрона в зазор;
 t — время выхода электрона из зазора.

После ряда алгебраических преобразований с учетом (2') и (5) получим

$$v = v_0 \frac{R \left[\frac{R}{R+1} \frac{\alpha}{\xi_{\text{и}}} (\cos \omega t_0 - \cos \omega t) + 1 \right]}{\left\{ 1 + (R^2 - 1) \left[\frac{R}{R+1} \frac{\alpha}{\xi_{\text{и}}} (\cos \omega t_0 - \cos \omega t) + 1 \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}, \quad (11)$$

где

$$\xi_{\text{и}} = \frac{\omega l_{\text{и}}}{v_0}.$$

Непосредственное использование соотношения (11) не представляется возможным, коль скоро остается неизвестной функциональная зависимость между временем входа электрона в зазор и временем выхода его из зазора. Эта функциональная зависимость может быть найдена интегрированием (9), причем величина t_0 полагается постоянной

$$l_{\text{и}} = \int_{t_0}^t v_0 \frac{R \left[\frac{R}{R+1} \frac{\alpha}{\xi_{\text{и}}} (\cos \omega t_0 - \cos \omega t) + 1 \right] dt}{\left\{ 1 + (R^2 - 1) \left[\frac{R}{R+1} \frac{\alpha}{\xi_{\text{и}}} (\cos \omega t_0 - \cos \omega t) + 1 \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}$$

или

$$\xi_{\text{и}} = \int_{\omega t_0}^{\omega t} \frac{R \left[\frac{R}{R+1} \frac{\alpha}{\xi_{\text{и}}} (\cos \omega t_0 - \cos \omega t) + 1 \right] d\omega t}{\left\{ 1 + (R^2 - 1) \left[\frac{R}{R+1} \frac{\alpha}{\xi_{\text{и}}} (\cos \omega t_0 - \cos \omega t) + 1 \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}. \quad (12)$$

Задавая ωt_0 и производя графическое интегрирование, можем получить интересное нас соотношение между ωt и ωt_0 .

Указанное интегрирование было выполнено для случая $U_0 = 400 \text{ кВ}$, $\xi_{\text{и}} = \frac{\pi}{2}$ и $\alpha = 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$. Результаты расчетов показали, что при релятивистских скоростях, не совершая ошибки большей 18% вплоть до $\alpha = 0,9$, можно принять

$$\omega t = \omega t_0 + \xi_{\text{и}}. \quad (13)$$

Заметим, что при релятивистских скоростях колебания угла пролета в течение периода уменьшаются по сравнению с нерелятивистским случаем. Это является прямым следствием уменьшения относительной вариации скорости при релятивистских скоростях.

Подставляя (13) в (11), будем иметь

$$v = \frac{v_0 R \left[\frac{R}{R+1} \alpha \sin \left(\omega t - \frac{\xi_{\text{и}}}{2} \right) + 1 \right]}{\left\{ 1 + (R^2 - 1) \left[\frac{R}{R+1} \alpha \sin \left(\omega t - \frac{\xi_{\text{и}}}{2} \right) + 1 \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}. \quad (14)$$

Используя биномиальные ряды, после ряда алгебраических преобразований получим

$$v = v_0 \left[1 + \frac{1}{2} I x M \sin \left(\omega t - \frac{\xi_{uc}}{2} \right) + \frac{1 \cdot 1}{2 \cdot 4} K x^2 M^2 \sin^2 \left(\omega t - \frac{\xi_{uc}}{2} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1 \cdot 1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6} L x^3 M^3 \sin^3 \left(\omega t - \frac{\xi_{uc}}{2} \right) + \frac{1 \cdot 1 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 8} N x^4 M^4 \sin^4 \left(\omega t - \frac{\xi_{uc}}{2} \right) \right], \quad (15)$$

где

$$I = \frac{2}{R(R+1)},$$

$$K = \frac{R(R-1)}{R^2(R+1)},$$

$$L = \frac{8(R-1)(4R^2+5)}{R^3(R+1)^2},$$

$$N = \frac{16(R-1)^2(4R^2+7)}{R^4(R+1)^2}.$$

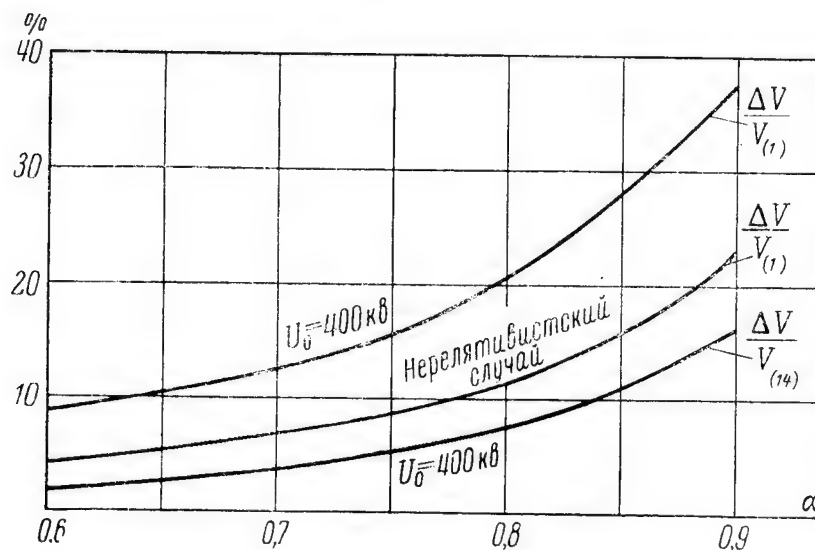


Рис. 4. Зависимость максимальной относительной погрешности при расчете полной скорости от коэффициента модуляции α для угла пролета $\xi_{uc} = \frac{\pi}{2}$.

$\frac{\Delta v}{v_{(1)}}$ — максимальная относительная погрешность формулы (1),

$\frac{\Delta v}{v_{(14)}}$ — максимальная относительная погрешность формулы (14).

Выражение (14) можно использовать также для определения приращения скорости ($v_{\sim} = v - v_0$) и величины обратной скорости ($\frac{1}{v}$).

В случае малых коэффициентов модуляции $\alpha \ll 1$ выражение (15) приводится к формуле (1). При нерелятивистских скоростях коэффициенты K, L, N обращаются в ноль, коэффициент $I = 1$, и мы приходим к обычному выражению, описывающему скоростную модуляцию в высокочастотном зазоре при малых сигналах.

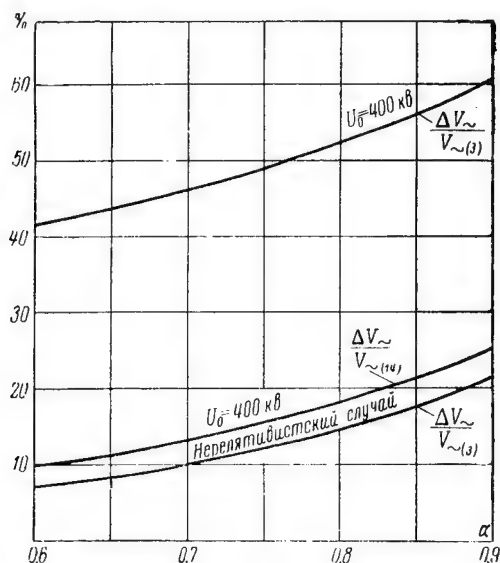


Рис. 5. Зависимость максимальной относительной погрешности при расчете приращения скорости от коэффициента модуляции α для угла пролета $\xi_{\text{ш}} = \frac{\pi}{2}$;

$\frac{\Delta v_{\sim}}{v_{\sim(3)}}$ — максимальная относительная погрешность формулы (3),

$\frac{\Delta v_{\sim}}{v_{\sim(14)}}$ — максимальная относительная погрешность формулы (14).

Результаты графического интегрирования (12) были применены для расчета максимальной относительной погрешности, которая получается при использовании выражений (1), (3), (4), (14). Величина U_0 по-прежнему равнялась 400 кВ и $\xi_{\text{ш}} = \frac{\pi}{2}$.

Истинные величины $v, v_{\sim}, \frac{1}{v}$ рассчитывались по формуле (11).

Максимальная погрешность при рассматриваемых коэффициентах модуляции α имела место при фазах входа электрона в высокочастотный зазор

$$\omega t_0 \approx \frac{7}{6} \pi \div \frac{5}{4} \pi,$$

в случае определения v , $\frac{1}{v}$ по формулам (1), (4), и v_{\sim} — по формуле (3). Максимальная погрешность соответствовала $\omega t_0 \approx \frac{\pi}{4}$ при расчете v_{\sim} по формуле (3).

Результаты расчетов представлены графически на рис. 4, 5, 6. Там же для сравнения приводятся кривые погрешностей при нерелятивистских скоростях.

Сравнение нерелятивистских и релятивистских кривых приводит к тем же выводам, что и в случае $\xi_{uc} = 0$.

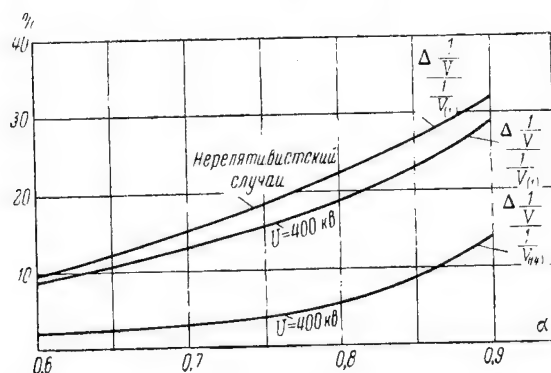


Рис. 6. Зависимость максимальной относительной погрешности при расчете величины обратной скорости от коэффициента модуляции α для угла пролета

$$\xi_{uc} = \frac{\pi}{2};$$

$\frac{\Delta \frac{1}{v}}{\frac{1}{v}}$ — максимальная относительная погрешность формулы (4);

$\frac{\Delta \frac{1}{v}}{\frac{1}{v_{(4)}}}$ — максимальная относительная погрешность формулы (14).

Из графиков следует, что использование формул (1), (4) с погрешностью, меньшей $10^0_{,0}$, возможно лишь при коэффициенте модуляции 0,6.

Наибольшую погрешность, достигающую $40^0_{,0}$ при $\alpha = 0,6$, дает, как и при $\xi_{uc} = 0$, формула (3).

Значительно лучшие результаты имеют место при использовании соотношения (14) для расчета v и $\frac{1}{v}$; погрешность в этом случае не превышает $10^0_{,0}$ вплоть до $\alpha = 0,8$.

В случае $\alpha > 0,8$, а при расчете приращения скорости уже для значительно меньших коэффициентов модуляции α приходится пользоваться выражением (11) и применять графическое интег-

рирование. При этом необходимо считаться с недостаточной точностью расчетов, обусловленной применением графического метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Chodorow, E. L. Ginzton, I. R. Neilsen, S. Sonkin, Design and Performance of a High Power Pulsed Klystron. Proceedings of the IRE, № 11, 1953, p. 1589.

2. С. А. Зусмановский и З. И. Хапланова, Продольная разгруппировка в мощных клистронах при малых параметрах группирования, Труды НИИ МРТП, выпуск 6 (36) 1956.

*Доктор техн. наук проф. К. И. КРЫЛОВ,
ассистент В. Л. ФЕДОРОВ*

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

Введение

Несмотря на то, что автоэлектронная эмиссия известна давно [1], техническое применение ее до настоящего времени ограничено. Кроме электронных проекторов, где особенно важным является точечный источник электронов, автокатоды почти нигде не применяются. Этот факт объясняется в основном тем, что автокато́ды обладают рядом существенных недостатков.

Основным недостатком автокатодов, изготовленных в виде острия, является нестабильность тока эмиссии и малое время жизни катодов. Кроме того, следует указать на трудности изготовления идентичных катодов и высокие требования к стабильности источников питания. Однако такие преимущества автокатодов, как исключительно высокая плотность эмиссионного тока, чрезвычайно малые размеры и мгновенная готовность к работе, отсутствие расхода мощности на подогрев катода, делают работы по созданию технических автокатодов достаточно актуальными.

Вопросу изучения причин нестабильной эмиссии автокатодов посвящен ряд работ [2, 3, 4, 5]. Было выяснено, что ионная бомбардировка катода является основной причиной, вызывающей нестабильность эмиссии. Ионная бомбардировка изменяет форму острия, тем самым изменяется градиент потенциала у поверхности катода, а следовательно, и ток эмиссии. Обычно при давлении остаточных газов 10^{-7} мм Hg, радиусе закругления острия катода 10^{-4} см и токе порядка 1 ма эмиссионный ток значительно изменяется за несколько минут работы катода. Одним из методов борьбы с ионной бомбардировкой может быть уменьшение давления остаточных газов. Было установлено, что для обеспечения времени жизни катода до 100 час. и более необходимо уменьшение давления остаточных газов до 10^{-11} — 10^{-12} мм Hg [4, 5]. Такое низкое давление может быть достигнуто в условиях эксперимента. Однако массовое изготовление ламп может обеспечить в лучшем случае 10^{-7} — 10^{-8} мм Hg. Ввиду этого особую важность приобретают попытки уменьшения вредного влияния ионной бомбардировки, не прибегая к уменьшению давления остаточных газов ниже 10^{-7} мм Hg, или попытки найти вещество, менее подверженное распылению.

Елинсон, Горьков и Васильев [6] предложили конструкцию близко расположенных катода и анода в виде пластинки с отверстием малого диаметра. Катод своим острием помещался на оси отверстия. Такая конструкция, ввиду искривления силовых линий поля вблизи катода, резко уменьшает объем, из которого может происходить бомбардировка ионами. Срок службы катода при такой конструкции превышает 80 час., что более чем на два порядка больше срока службы автокатодов в обычно принятых конструкциях.

Нестабильность эмиссии автокатада вызывается также адсорбцией остаточных газов на поверхности катода [3, 5, 7]. Адсорбированный слой обычно не стоек и может быть разрушен нагреванием катода или ионной бомбардировкой. Так как адсорбированный слой изменяет работу выхода, то имеет место нестабильность автотока еще и по этой причине. Следует заметить, что изменения тока эмиссии, вызванные адсорбцией, приводят к нерегулярным изменениям тока, но никогда не наблюдается исчезновение эмиссионных свойств катода.

Дайк [2] предложил применять подогрев катода во время его работы для уменьшения нежелательного влияния адсорбции на стабильность автотока. Этим методом ему удалось улучшить стабильность работы катодов из вольфрама.

Барнс [3] исследовал с этой же целью рений. Рений гораздо меньше, чем другие металлы, адсорбирует кислород. Убедительные эксперименты по изучению стабильности рениевых автокатодов говорят о том, что отравление остаточным кислородом катода из рения значительно меньше, чем вольфрама. Рениевый автокатод электронного проектора находился в одном объеме с контрольным вольфрамовым. В то время как для вольфрамового автокатада наблюдалась картина отравления остаточным кислородом, подобной картины для рениевого катода не обнаруживалось.

Адсорбция остаточных газов на катоде может быть уменьшена также понижением их давления в лампе и тщательной предварительной очисткой электродов. Однако, как было уже замечено, в настоящее время только в экспериментальных установках достигнуто давление ниже чем 10^{-10} мм Hg.

Трудности технологического порядка возникают также при изготовлении идентичных по своим свойствам автокатодов. В настоящее время наиболее широко применяющимся способом изготовления автокатодов в виде острия с малым радиусом закругления является электролитическое травление проволок малого диаметра в щелочном растворе или в растворе соли. Процессы электролитического травления при микроскопических размерах детали трудно поддаются контролю или стандартизации. Ввиду этого изготовить идентичные катоды методом электролитического травления затруднительно. Однако за последние годы и в этом направлении достигнуты значительные успехи [6, 8, 9].

Как известно, плотность тока автоэлектронной эмиссии резко зависит от напряженности электрического поля у поверхности катода. Поэтому, если не применять специальных мер, то для питания автокатодов требуются достаточно стабильные источники. Это свойство автокатодов также является серьезным препятствием для их технического использования.

Таким образом, можно сказать, что в настоящее время имеется возможность конструировать автокатоды со сроком службы, превышающим 100 час., если в лампе обеспечено давление остаточных газов ниже $10^{-10} - 10^{-11}$ мм Hg. При этом стабильность автотока во время работы достаточно высока. Если необходимо иметь долго работающий катод в лампе с худшим, чем $10^{-10} - 10^{-11}$ мм Hg, вакуумом, то необходимо применять виртуальный анод или искать других путей по повышению времени жизни катода [10, 11, 12, 13, 14, 15].

II. Конструкция автокатада, технологические режимы его изготовления

Все исследования, изложенные выше, шли по пути устранения или уменьшения ионной бомбардировки и адсорбции остаточных газов, что увеличивает время жизни автокатодов и стабилизирует эмиссию.

В настоящей работе предлагается использовать автокатоды, изготовленные из весьма тонких вольфрамовых проволок диаметром несколько микрон. Микрофотография типичного по форме катода приведена на рис. 1. Естественно ожидать, что при подоб-



Рис. 1. Теневая фотография автокатада.

ной конструкции катода ионная бомбардировка будет вызывать лишь постепенный износ катода, в то время как радиус закругления на конце проволоки не будет расти со временем. Ввиду того, что напряженность электрического поля у поверхности острия в основном определяется радиусом кривизны острия и мало зависит от расстояния между острием и вторым электродом, увеличение последнего вследствие износа острия практически не должно сказываться на величине поля. Таким образом, при износе острия во время работы, то есть при укорочении проволоки, из которой сделан автокатод, вольтамперная характеристика не должна значительно изменяться. Так, например, при диаметре автокатада $2,0 \cdot 10^{-4}$ см и расстоянии между электродами порядка 1 см укорочение катода на 10 его диаметров приведет к уменьшению напряженности поля примерно на $10^{-3} - 10^{-4}\%$, что при-

ведет к незначительному изменению тока при заданной разности потенциалов. Таким образом, следует ожидать достаточно большого срока службы катода.

Стабильность эмиссионного тока катода во время его работы будет определяться микроостриями на эмитирующем конце катода. Микроострия могут возникать и исчезать за счет ионной бомбардировки. Степень изменения тока эмиссии, вызванную этой причиной, можно определить лишь экспериментально. В дальнейшем будет показано, что существует возможность стабилизировать ток эмиссии специальным режимом работы катода.

Автокатоды диаметров, меньших $1,0 \cdot 10^{-3}$ см, изготовлялись электролитическим травлением в санинормальном растворе NaOH на переменном токе. Последовательно с электролитической ванной было включено сопротивление в 500 ом. Продолжительность травления варьировалась от 20 до 35 сек. Диаметр получаемой проволоки контролировался на оптическом проекторе.

Автокатоды диаметров больше $1,0 \cdot 10^{-3}$ см изготовлялись из набора проволок диаметрами до $2,2 \cdot 10^{-3}$ см. Какой-либо специальной обработки конца проволоки для всех изготовленных катодов не проводилось.



Рис. 2. Фотография диода с автокатодом.

Диоды простейшей конструкции (рис. 2) откачивались до давления $3-5 \cdot 10^{-7}$ мм Hg. Проводился обычный 4—5-часовой цикл обезгаживания стекла и металлических деталей.

Во время откачки производилась тренировка и предварительная формовка катода. Под формовкой катода в дальнейшем будем понимать установление формы катода за счет ионной бомбардировки и миграции атомов при прогреве катода джоулевым теплом.

Величина тока эмиссии при формовке устанавливалась такой, чтобы температура катода была примерно $1000-1200^\circ$ C. Определение температуры производилось расчетным путем из уравнения теплового баланса катода. При тренировке на постоянном

токе можно было заметить свечение нагретого катода. Автоэлектронный ток при формовке катода обнаруживал резкие скачкообразные изменения. В основном скачки тока приводили к уменьшению тока. После 10–20-минутной формовки автоэлектронный ток значительно стабилизировался. Подобную стабилизацию можно отнести к следующему механизму. При температуре катода порядка $1000–1200^{\circ}\text{C}$ и выше адсорбированного на поверхности вольфрама кислорода не существует. Одновременно с этим, всякий выступ на катоде, возникший благодаря ионной бомбардировке, вызовет увеличение плотности тока с этого участка, что в свою очередь приведет к повышению температуры выступа и его плавлению или испарению. Таким образом, всякое изменение формы острия будет автоматически исправляться.

В дальнейшем окончательная формовка катода проводилась на импульсном режиме в отпаянной лампе с применением титанового геттера. При формовке катода и его исследованиях применялась схема с балластным сопротивлением, включенным последовательно с лампой. Ввиду того, что дифференциальное сопротивление диода мало, все изменения э. д. с. источника питания падают на балластном сопротивлении. Естественно, что несколько большая, чем обычно наблюдаемая, стабильность автотока в наших примерах определяется также примененной схемой включения. Кроме этого, применение схемы с балластным сопротивлением снижает требования к стабильности источников питания.

III. Экспериментальные исследования стабильности и срока службы автокатодов

Данные по исследованию стабильности и срока службы автокатодов представлены на графике (рис. 3). Измерения проведены в импульсном режиме, с частотой следования импульсов 300 гц и длительностью импульса 0,8 мксек и на постоянном токе. При плотностях тока $10^5–10^6 \text{ а/см}^2$ в импульсном режиме ток эмиссии обнаруживает некоторые внезапные изменения. Максимальная амплитуда таких изменений достигает 20% от номинального тока. Расчетная температура катода в этих условиях $300–600^{\circ}\text{C}$. Время жизни катода превышает 50 час.

При плотностях тока $10^6–10^7 \text{ а/см}^2$, которые соответствуют расчетной температуре $1000–1500^{\circ}\text{C}$, ток эмиссии значительно более стабилен. Амплитуда изменений тока не превышает 3–5% от номинального значения, время жизни катода превышает 50 час. Видимо, подобный режим работы автокатаода наиболее приемлем для технического использования. При этом можно получать токи порядка ампера при напряжении источника питания 20–30 кв. При дальнейшем увеличении плотности тока до $5 \cdot 10^7 \text{ а/см}^2$ (расчетная температура катода $2000–2300^{\circ}\text{C}$) возникает дуга, и катоды гибнут.

На постоянном токе при плотности тока $5 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^3 \text{ а/см}^2$, что соответствует расчетной температуре катода $300 - 600^\circ \text{С}$, имеем также резкие скачкообразные изменения автотока. Максимальная амплитуда этих изменений достигает 50% от номинального значения тока. При увеличении плотности тока до $5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^4 \text{ а/см}^2$ наблюдается значительная стабилизация тока (рас-

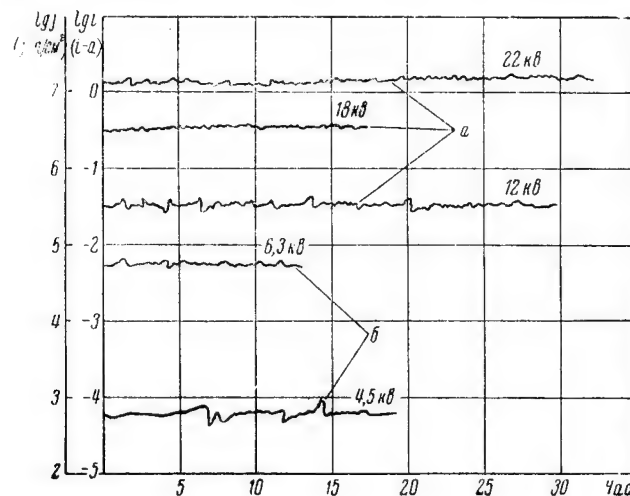


Рис. 3. Временная зависимость автотока.
а — импульсный режим; б — постоянный ток.

четная температура катода $1000 - 1500^\circ \text{С}$). Максимальная амплитуда изменений тока составляет $5 - 10\%$ от номинального значения. При дальнейшем увеличении плотности тока до 10^5 а/см^2 (расчетная температура $2000 - 2300^\circ \text{С}$) возникает дуга, и катоды гибнут.

Таким образом, наиболее рациональным режимом работы автокатада следует считать режим с температурой катода $1000 - 1500^\circ \text{С}$. Для диаметров катода порядка 10^{-3} см эта температура соответствует плотности тока 10^7 а/см^2 при импульсном режиме и $5 \cdot 10^4 \text{ а/см}^2$ на постоянном токе.

IV. Расчет теплового режима автокатада

Конструкция автокатада показана на рис. 1. Будем считать, что ток равномерно распределен по сечению катода. Тогда уравнение теплового баланса автокатада без учета радиального распределения температуры, излучения с торца катода и нагревания за счет ионной бомбардировки имеет следующий вид:

$$rj^2 p dt + 2\sigma T_0^4 dt - 2\sigma T^4 dt - ra \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dt - rcpdT = 0 \quad (1)$$

где

ρ, c, p, σ — соответственно удельное сопротивление, теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности;

r — радиус катода;

T — температура;

T_0 — температура окружающей катод среды;

t — время;

j — плотность тока;

σ — постоянная закона Стефана—Больцмана.

Первый член уравнения ответствен за нагревание катода джоулевым теплом; следующие соответственно — за излучение, теплопроводность, теплоемкость.

При принятой нами конструкции автокатода и режиме его работы член уравнения, ответственный за теплопроводность, мал по сравнению с остальными. После пренебрежения этим членом переменные легко отделяются и решение имеет вид

$$y \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{2} (\operatorname{arcth} x + \operatorname{arctg} x) \Big|_{T_1}^{T_2}, \quad (2)$$

где

$$y = \frac{2\sigma T_0^3}{rcp} t, \quad (3)$$

$$x = \frac{T}{T_0}, \quad (4)$$

если $j = 0$ (автокатод охлаждается) и

$$y = \frac{(2\sigma)^{1/4} (rj^2\rho + 2\sigma T_0^4)^{3/4}}{rcp} t, \quad (5)$$

$$x = \left(\frac{2\sigma}{rj^2\rho + 2\sigma T_0^4} \right)^{1/4} T, \quad (6)$$

если $j = \text{const}$ $j|_{t=0} = 0$ (автокатод нагревается током). Для стационарного режима имеем $y \rightarrow \infty$, при этом $x \rightarrow 1$. Отсюда легко определить температуру катода

$$T = \left(\frac{rj^2\rho + 2\sigma T_0^4}{2\sigma} \right)^{1/4}. \quad (7)$$

Для импульсного режима необходимо „сшить“ решения для процесса нагревания и охлаждения. Обозначим максимальную температуру катода через T_2 , минимальную температуру через T_1 , время охлаждения катода через τ_2 , время нагревания через τ_1 . Тогда имеем следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\sigma T_0^3}{rcp} \tau_2 &= \frac{1}{2} \left(\operatorname{arcth} \frac{x_1 - x_2}{1 - x_1 x_2} + \operatorname{arctg} \frac{x_1 - x_2}{1 - x_1 x_2} \right)_{\text{охл}} \\ \frac{(2\sigma)^{1/4} (rj^2\rho + 2\sigma T_0^4)^{3/4}}{rcp} \tau_1 &= \frac{1}{2} \left(\operatorname{arcth} \frac{x_2 - x_1}{1 - x_1 x_2} + \operatorname{arctg} \frac{x_2 - x_1}{1 - x_1 x_2} \right)_{\text{нагр}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где x_1 и x_2 — приведенные переменные [см. формулы (4) и (6)] после подстановки соответственно T_1 и T_2 . Система уравнений (8) определена при

$$\left| \frac{x_1 - x_2}{1 - x_1 x_2} \right| < 1.$$

Воспользуемся этим обстоятельством и разложим $\operatorname{arctg} \frac{x_1 - x_2}{1 - x_1 x_2}$ и $\operatorname{arctg} \frac{x_1 - x_2}{1 - x_1 x_2}$ в ряд Маклорена по степеням $\frac{x_1 - x_2}{1 - x_1 x_2}$. После пренебрежения всеми членами разложения, кроме двух первых и соответствующих подстановок имеем систему

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\sigma T_0^2}{rep} \tau_2 &= \frac{T_1 - T_2}{T_0^2 - T_1 T_2} \\ \frac{(2\sigma)^{1/2} (rf^2 \rho + 2\sigma T_0^4)^{1/2}}{rep} \tau_1 &= \frac{T_2 - T_1}{\left(\frac{rf^2 \rho + 2\sigma T_0^4}{2\sigma} \right)^{1/2} - T_1 T_2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Система уравнений позволяет определить экстремальные значения температуры катода, если заданы плотность тока, время нагревания и охлаждения и геометрия катода.

V. Расчет плотности тока эмиссии автокатода

Расчет плотности тока автоэлектронной эмиссии при заданной температуре катода может быть произведен методом численного интегрирования. Для этого могут быть использованы графики, предложенные Долланом и Дайком [22]. Однако для практических целей возможен более простой приближенный расчет тока автоэлектронной эмиссии по формуле Фаулера — Нордгейма [16, 17, 18, 19, 20]

$$j = 1,55 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\varphi} e^{-\frac{6,85 \cdot 10^7 \varphi^{3/2}}{E}} \theta \left(\frac{3,62 \cdot 10^{-4} \sqrt{E}}{\varphi} \right) [a/cm^2], \quad (5)$$

где

E — напряженность электрического поля в v/cm ;

φ — работа выхода в эв;

θ — специальная функция, табулированная Нордгеймом.

Наиболее удобно при этом воспользоваться графиками рис. 4, составленными нами по формуле (5), и таблицам, рассчитанным Долланом [21].

VI. Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что автокатоде, изготовленные из весьма тонких проволок, обладают достаточной для ряда практических целей стабиль-

ностью и сравнительно большим сроком службы. Плотность тока эмиссии таких автокатодов достигает 10^7 а см^2 в импульсном режиме и $5 \cdot 10^4 \text{ а см}^2$ в режиме постоянного тока.

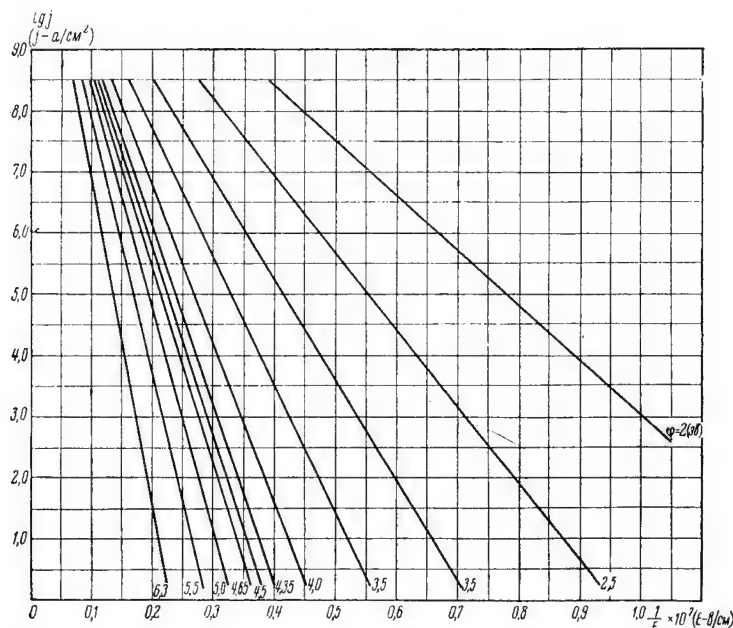


Рис. 4. Зависимость плотности тока автоэлектронной эмиссии от напряженности поля, φ — работа выхода в эв.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. W. Wood, Phys. Rev., 5, 1, 1897.
2. W. P. Dyke, J. P. Barbour, E. E. Martin, J. K. Trolan, Phys. Rev., 99, 4, 1192, 1955.
3. G. Barnes, Phys. Rev., 97, 6, 1579, 1955.
4. W. P. Dyke, J. K. Trolan, Phys. Rev., 89, 4, 799, 1953.
5. F. Kirchner, Zangew. Phys., 5, 8, 281, 1953.
6. М. И. Елинсон, В. А. Горьков, Г. Ф. Васильев, Радиотехника и электроника, 2, 2, 207, 1957.
7. М. И. Елинсон, Г. Ф. Васильев, Радиотехника и электроника, II, 3 348, 1957.
8. W. P. Dyke, J. K. Trolan, W. W. Dolan, G. Barnes, J. Appl Phys., 24, 570, 1953.
9. F. W. Niemeck, D. Rupp, Zs Angew Phys., 6, 1, 1954.
10. В. С. Вавилов, УФН, 42, 580, 1950.
11. F. A. Vick, Sc Progress, 42, 59, 1954.
12. K. O. Jenkins, Rep Progr Phys., 9, 177, 1943.
13. J. E. Lilienfeld, Phys. Zs, 20 280, 1919, Verh dtsch Phys. ges, 2, 131, 1921. Phys. Zs, 23, 506, 1922.
14. Д. В. Зернов, М. И. Елинсон, Радиотехника и электроника, 1, 1, 5—22, 1956.

15. Б. М. Чапев, УФН, 36, 181, 1948.
 16. L. W. Nordheim, Proc Roy Soc A, 121, 628, 1928.
 17. B. H. Fowler, Proc Roy Soc. A, 119, 173, 1928.
 18. L. W. Nordheim, Phys. Zs, 30, 177, 1929.
 19. R. E. Borgess, H. Kroemer, J. Honton, Phys. Rev., 90, 515, 1953.
 20. M. Drechsler, E. Muller, Zs. f. Phys., 134, 208, 1953.
 21. W. W. Dolan, Phys. Rev, 91, 3, 510, 1953.
 22. W. W. Dolan and W. P. Dyke. Phys. Rev, 95, 2, 327, 1954.
-

*Доктор техн. наук проф. К. И. КРЫЛОВ,
аспирант А. Г. БОНЧ-ОСМОЛОВСКИЙ*

ИМПУЛЬСНЫЕ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ БОЛЬШОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ

Введение

Задача получения сильных магнитных полей уже давно привлекает к себе внимание исследователей в связи с большим количеством возможных их применений для решения различного рода физических и технических проблем.

Магнитные поля большой напряженности могут быть получены либо от постоянных магнитов, либо от электромагнитов. Существующие в настоящее время электромагниты могут быть подразделены на две основные группы: электромагниты с ферромагнитными сердечниками и соленоиды без ферромагнетиков. Величина магнитного поля постоянных магнитов, вследствие насыщения ферромагнитных материалов, лежит в пределах до 10^4 эрст, в редких случаях достигая 30 000 эрст. Использование соленоидов, питаемых от мощного источника электрического тока, позволяет повысить этот предел. Известен, например, электромагнит в одной из лабораторий в Кембридже, дающий в непрерывном режиме поля до 120 000 эрст. Естественно, что в связи со значительной потребляемой мощностью — порядка десятков и даже сотен киловатт — такие электромагниты требуют специального интенсивного охлаждения, что делает всю установку громоздкой и в своем роде уникальной. В связи с этим, а также ввиду необходимости получения больших магнитных полей, в последнее десятилетие стали интенсивно развиваться методы получения импульсных магнитных полей большой напряженности. Начало этого направления было положено в 1924 г. классическими работами Капицы [1]. Им были получены и применены для различных физических задач кратковременные магнитные поля сверхвысокой интенсивности.

Капица получил магнитные поля в соленоидах без сердечника, причем им были использованы два различных способа — кратковременный разряд аккумуляторной батареи и короткое замыкание на катушку мощного генератора, разогнанного до значительной скорости. Наибольшая величина магнитного поля, полученного им, достигала 500 000 эрст [2].

Капицей же была обсуждена возможность получения сильного магнитного поля при разряде батареи конденсаторов на катушку.

В последнее время работы по импульсным магнитным полям проводились именно с использованием разряда конденсаторов [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Следует отметить работы де-Гааза и Вестердика [4], а также Олсена [7], получивших поля порядка 200 000 *эрст* в катушках, охлаждаемых жидким гелием, при разряде со сравнительно малой энергией.

Особый интерес представляет работа Рау [5], который, применив специальную импульсную схему, получил поле напряженностью 50 000 *эрст* с частотой повторения сто раз в секунду.

Наибольшее поле, полученное до настоящего времени, достигло в работе Фонера и Кольма [12] 750 000 *эрст*.

Нам представлялось, что магнитные поля большой напряженности, в особенности периодические импульсные магнитные поля, могут найти весьма широкое применение в радиоэлектронике для питания различного рода электровакуумных приборов сверхвысокой частоты, работающих в импульсном режиме и осуществления фокусировки мощных электронных потоков. С этой целью на кафедре радиоэлектроники были проведены работы по получению магнитных полей большой напряженности.

Настоящая статья посвящена изложению предварительных результатов изучения полей напряженностью свыше 100 000 *эрст* с малой частотой повторения и меньших полей—порядка 10 000 *эрст*, но с большой частотой повторения, 50—100 раз в секунду.

§ 2. Теоретические обоснования

Как известно, напряженность магнитного поля в точке *A* (рис. 1)

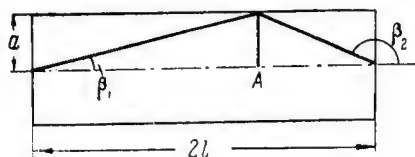


Рис. 1.

по оси соленоида, имеющего длину $2l$ и обмотку из N витков (намотанную в один слой), выражается формулой

$$H = \frac{0,1 \pi IN}{l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2), \quad (1)$$

где H — напряженность магнитного поля в эрстедах;
 I — ток в амперах;
 β_1 и β_2 — углы, указанные на рис. 1.

В центре катушки напряженность магнитного поля будет равна

$$H = \frac{0,2 \pi N}{l} \cos \beta_1, \quad \cos \beta_1 = \frac{l}{\sqrt{l^2 + a^2}}. \quad (1a)$$

При написании формулы (1) предполагается, что радиус проволоки обмотки гораздо меньше a — радиуса соленоида. Нетрудно обобщить формулу (1) и (1a) на случай многослойной обмотки, так как каждый слой вносит вклад в H , пропорциональный $\cos \beta$.

Формула (1) показывает, что при прочих равных условиях напряженность магнитного поля тем больше, чем больше плотность тока, протекающего по обмотке соленоида. Практически это означает, что для создания больших магнитных полей необходимо пропускать значительные токи, т. е. затрачивать большую электрическую энергию, что вызывает необходимость соответствующего охлаждения катушки. Это наглядно видно из формулы Кокрофта [13], устанавливающей непосредственное соотношение между напряженностью магнитного поля и затрачиваемой электрической мощностью,

$$H = \left(\frac{W_\lambda}{a \rho} \right)^{\frac{1}{2}} \varpi, \quad (2)$$

где W — рассеиваемая в соленоиде мощность;

λ — доля, занимаемая проводником в поперечном сечении катушки;

a — внутренний радиус катушки;

ρ — удельное сопротивление проводника;

ϖ — фактор, определяющийся геометрией катушки (обычно порядка 0,2).

Нетрудно дать обобщение формулы (1) на случай соленоидов, выполненных из провода, с характерным геометрическим размером поперечного сечения, сравнимым с внутренним радиусом соленоида. Так, например, для соленоида из N витков, разрез которого изображен на рис. 2 (витки в разрезе — прямоугольного сечения) в двух различных случаях: равномерного распределения тока по сечению витка и распределения $i = \frac{c}{\rho}$, (где ρ — радиус определенного слоя), формулы для напряженностей магнитного поля имеют, соответственно, следующий вид:

$$H = \frac{0,2 \pi N I}{a_2 - a_1} \ln \frac{a_2 + \sqrt{l^2 + a_2^2}}{a_1 + \sqrt{l^2 + a_1^2}}, \quad (3)$$

$$H = \frac{0,2 \pi N I}{l \ln a_2/a_1} \ln \left(\frac{a_2}{a_1} \cdot \frac{l + \sqrt{l^2 + a_1^2}}{l + \sqrt{l^2 + a_2^2}} \right). \quad (4)$$

Теория импульсных магнитных полей, получаемых в катушке при разряде через нее батареи конденсаторов, в наиболее удобной форме изложена в статье Чэмпiona [6].

Пусть мы имеем контур, изображенный на рис. 3, обладающий сопротивлением R и самоиндукцией L . В момент, когда конденсатор C заряжается до заданного напряжения U , элемент A (это может быть любое устройство — механическое или электронное, в простейшем случае — разрядный промежуток) замыкает контур и в нем происходят электрические колебания.

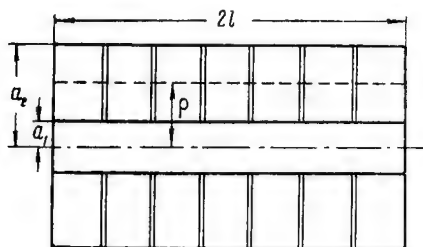


Рис. 2.

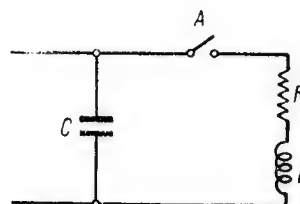


Рис. 3.

Если бы сопротивление контура R равнялось нулю, то колебания были бы незатухающими и электрическая энергия, накопленная в конденсаторе и равная $\frac{CU^2}{2}$, полностью переходила бы в электромагнитную энергию

$$\frac{Li^2}{2} \quad \text{или} \quad \frac{\mu}{8\pi} \int H^2 dv,$$

где H — магнитное поле, создаваемое катушкой. В этом идеальном случае мы получили бы магнитное поле, синусоидально изменяющееся во времени с циклической частотой

$$1 / \sqrt{LC},$$

величина которого в центре катушки давалась бы формулой

$$H = \sqrt{\frac{20C}{l}} \frac{U}{a_1} S, \quad (5)$$

где H — в эрстедах;
 U — в вольтах;
 l и a_1 — в сантиметрах;
 C — в микрофарадах.

Геометрический фактор S в формуле (5) зависит от конфигурации катушки и от распределения тока по виткам обмотки. Для случая равномерного распределения тока (см. формулу 3) в

статье Чэмпиона даны графики величины S в зависимости от l/a_1 и a_2/a_1 (см. рис. 2 и рис. 4). При $a_2/a_1 \cong 1$ этот фактор близок к 1.

Когда сопротивление контура R не равно нулю, величина магнитного поля уменьшается, вследствие того, что энергия $\frac{CU^2}{2}$ не полностью переходит в энергию магнитного поля — часть ее рассеивается на джоулево тепло. Учет этого обстоятельства в

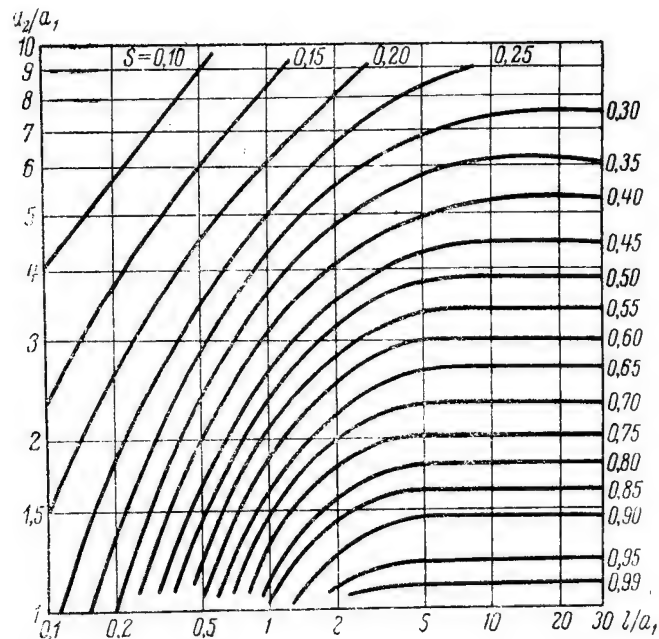


Рис. 4.

работе [6] был проведен не вполне корректно. Нетрудно показать, что в этом случае вместо формулы (5) будем иметь

$$H = \sqrt{\frac{20C}{l}} \frac{U}{a_1} SJ, \quad (6_1)$$

где

$$J = \frac{i_1}{i_{R=0}} = e^{-\frac{\delta}{\omega} \arcsin \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\omega}\right)^2}}}, \quad (6_2)$$

$$\delta = \frac{R}{2L}, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

В формуле (6₂) $i_{R=0}$ — амплитуда тока в контуре при отсутствии сопротивления,
 i_1 — первая амплитуда тока в контуре с сопротивлением R .

Формула (6₂) отличается от соответствующей формулы (5) работы [6] иным выражением для J .

Вычисление величин S , R , L , входящих в формулу (6₁) и (6₂), по графикам работы [6] справедливо только для катушек, намотанных тонким проводом с равномерным распределением тока, для которых влиянием поверхностного эффекта можно пренебречь; таким образом, из рассмотрения исключаются соленоиды того типа, который изображен на рис. 2, т. е. с витками из проволоки большого поперечного сечения.

Период изменения импульсного магнитного поля, получаемого при разряде конденсатора, может составлять величину порядка нескольких микросекунд. В этом случае глубина проникновения поля в медь достигает 0,1 мм, и распределение тока по сечению витков соленоида становится неравномерным вследствие поверхностного эффекта. Если витки представляют собой кольца большого сечения (например, см. рис. 2), то, как показал Фок [14], высокочастотный ток в таком кольце стремится сжаться в область, прилегающую к внутреннему радиусу кольца. Понятно, что при этом и фактор S , и величины сопротивления и самоиндукции соленоида значительно изменяются. Учесть эти изменения строго количественно весьма затруднительно, так как формулы Фока справедливы при очень высоких частотах и в случае массивных колец чрезвычайно сложны (к тому же они выведены в применении к изолированному кольцу кругового сечения).

Следует отметить также, что в некоторых случаях действительные значения параметров контура могут заметно отличаться от величин, вычисленных только для катушки вследствие индуктивности и сопротивления остальных элементов контура. Учет этих изменений, видимо, может быть произведен только экспериментально (более подробно см. § 5).

§ 3. Периодические магнитные поля напряженностью порядка 10 000 э для фокусировки электронных потоков

Для фокусировки электронных потоков ламп, работающих в импульсном режиме, обычно применяется магнитное поле, создаваемое соленоидами. При этом для получения значительных магнитных полей питание катушки осуществляется весьма большим постоянным током. В некоторых случаях, когда употребление ферромагнитных сердечников по той или иной причине оказывается нежелательным, необходимая величина токов достигает нескольких тысяч ампер. Получение подобных постоянных токов встречает большие затруднения. Следует отметить, что хотя лампа

работает в импульсном режиме, питание катушек током осуществляется непрерывно.

Нам представлялось возможным для целей фокусировки применять переменное магнитное поле, изменяющееся по синусоидальному закону. Ввиду того, что получение больших переменных токов осуществляется путем трансформации, при этом можно избежать основной трудности создания сильных магнитных полей, связанной с источниками питания.

Идея состоит в том, что импульсы напряжения в лампе синхронизируются с периодическим магнитным полем таким образом, чтобы импульс электронного потока приходился на максимум магнитного поля. Поскольку импульсы электронного потока весьма короткие (≈ 1 мксек), по сравнению с периодом переменного тока, питающего катушку, то в течение времени пролета электронов в лампе магнитное поле с большой степенью точности является постоянным.

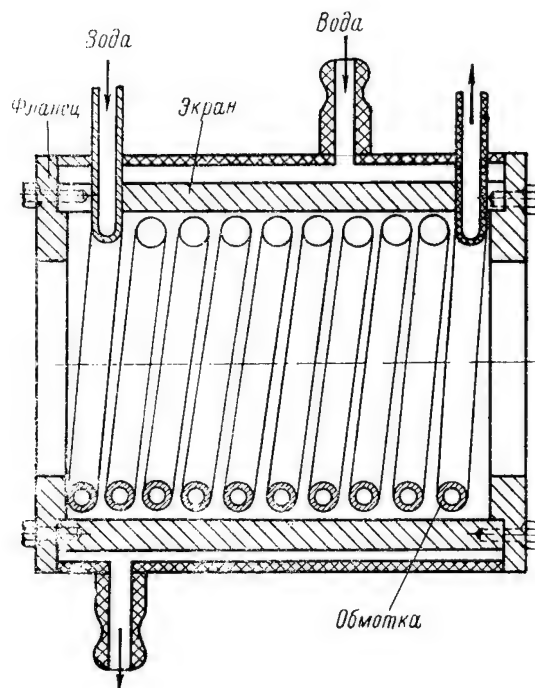


Рис. 5.

Мы с успехом применяли такие магнитные поля в том случае, когда употребление ферромагнитных сердечников не представлялось возможным. При этом фокусирующие магнитные

поля создавались с помощью различного типа катушек. Одна из них, например, (рис. 5) представляла собой соленоид из десяти витков медной трубки диаметром 6 мм, внутренний радиус соленоида равнялся 20 мм, а длина — 100 мм. В целях магнитного экранирования катушка помещалась в оболочку из мягкой стали, которая также охлаждалась водой (нагрев оболочки происходил за счет токов Фуко). Катушка замыкалась на вторичную обмотку мощного понижающего трансформатора (коэффициент трансформации 1,47), питаемого от сети 220 в.

Амплитуда магнитного поля в центре катушки на оси, измеренная с помощью маленькой измерительной катушки с известной геометрической постоянной, равнялась 4500 эрст при потребляемой мощности около 8 квт. На концах катушки поле было примерно в два раза меньшим. Экспериментально найденное распределение поля по оси катушки представлено на рис. 6. Там же для сравнения приведено рассчитанное распределение поля для той же катушки (без экрана), — пунктирная линия.

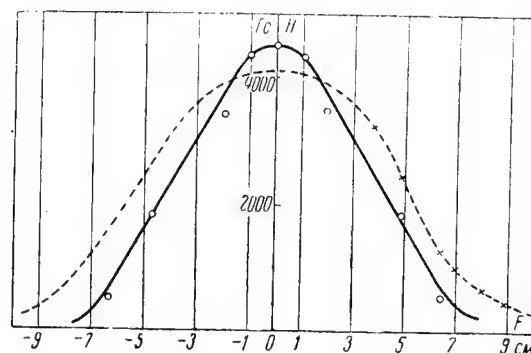


Рис. 6.

Другая катушка, на большие магнитные поля, представляла собой соленоид типа, изображенного на рис. 2. Четыре медных разрезанных кольца прямоугольного сечения, толщиной 0,9 см, с внутренним диаметром 1 см и внешним 5 см спаивались друг с другом серебром по секторам, прилегающим к разрезам, так что катушка в собранном виде имела 3,6 витка. Подвод тока к крайним дискам осуществлялся с помощью шин секториального сечения, рассчитанных так, чтобы распределение тока по сечению витков было близким к равномерному. Согласно формуле (3), постоянная H/I для такой катушки равняется 0,91 эрст/а.

Катушка вместе с токоподводами интенсивно охлаждалась водой. При потребляемой мощности около 80 квт плотность тока в катушке составляла около 100 а/мм² ($I \approx 19\,000$ а). При этом измеренное значение амплитуды магнитного поля в центре катушки достигало 23 000 эрст, что согласуется с формулой (3).

§ 4. Импульсные периодические магнитные поля напряженностью порядка 10^4 эрст для питания электровакуумных приборов

Приведенные в предыдущем параграфе величины еще раз подтверждают то положение, что для создания магнитных полей порядка 10^4 эрст с помощью соленоидов требуются значительные мощности и эффективное охлаждение, что приводит к непроизводительной затрате энергии и значительному усложнению установки. Между тем, для питания магнитным полем электронных приборов, работающих в импульсном режиме, в принципе не требуется такой затраты энергии, так как магнитное поле нужно только в течение очень короткого времени, лишь немногим превышающего длительность импульса электронного потока в приборе. Это относится как к магнитным полям для фокусировки электронных потоков, так и вообще к тем магнитным полям, которые управляют движением электронов в приборах (например, магнетроны).

Впервые периодическое импульсное магнитное поле напряженностью 50 000 эрст повторяемостью сто раз в секунду с помощью разряда батареи конденсаторов получил Рау в 1949 г. [5]. Принцип работы его схемы (рис. 7) состоит в следующем. Транс-

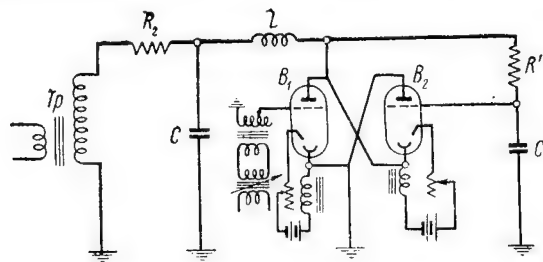


Рис. 7.

форматор высокого напряжения подзаряжает конденсатор C сто раз в секунду через сопротивление R_2 до напряжения U . Каждый полупериод происходит разряд конденсатора через мощные ртутные выпрямители B_1 и B_2 с сетками, используемые как тиратроны и включенные навстречу друг другу. Управление разрядом осуществляется путем подачи на сетку B_1 переменного напряжения определенной амплитуды с регулируемым сдвигом фазы. Разряд B_2 управляется цепью дополнительного конденсатора C' и сопротивления R' .

Сопротивление основного разрядного контура выбирается по возможности малым в целях уменьшения потерь в контуре и уменьшения необходимой мощности подзаряда конденсатора.

В работе Рау применялась емкость $C = 0,25$ мкф, при напряжении $U = 73$ кв. Катушка состояла из 30 витков с постоянной $NI = 6,3$ эрст/а. Продолжительность импульса составляла около

15 микросекунд и затрачиваемая на подзаряд конденсатора мощность — около 850 *вт*. Недостатками схемы Рау являются: наличие высокого напряжения — 73 *кв*, что создает неудобства как с точки зрения безопасности установки, так и трудности изоляции; неустойчивость работы схемы — время от времени разряд „гасил“ выпрямители, а также то, что частота следования импульсов, особенно обратной полярности, через B_2 была нестабильна.

Предварительная установка, собранная нами (рис. 8), предусматривала применение сравнительно низкого напряжения. В первой стадии работы вопрос о стабильности схемы по частоте нами еще не решался.

Трансформатор T через газотрон Γ заряжал батарею конденсаторов емкостью $C = 23$ *мкф* до напряжения не выше 3 *кв*. Механическим выключателем замыкалась цепь поджигания игнитрона с частотой до 10 *гц*, и конденсаторы разряжались через катушку L , имеющую длину 80 *мм*, радиус 20 *мм* и 37 витков медного провода, намотанного в один слой. При этом продолжительность импульса составляла около 160 микросекунд.

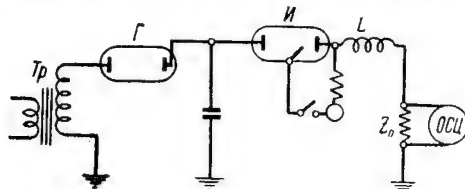


Рис. 8.

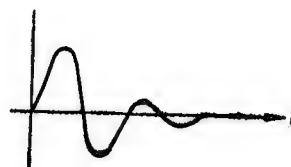


Рис. 9.

Параметры схемы были таковы: $R_{\text{конт}} = 0,11 \Omega$; $L_{\text{кат}} = 2,3 \cdot 10^{-5}$ *гн*; $L_{\text{конт}}$ (измер.) $\approx 3 \cdot 10^{-5}$ *гн*; фактор $S \approx 0,95$; фактор $J \approx 0,95$. Для данного случая с хорошей степенью точности справедлива формула (6), которая дает: $H = 4,83$ *У*. Рассчитанная постоянная катушки $H/I = 5,13$ *эрст/а*. Зная численное значение этой постоянной и измерив ток в контуре, можно найти экспериментальное значение магнитного поля в центре катушки. Ток измерялся при помощи манганинового шунта, имеющего сопротивление $r_0 = 0,0248 \Omega$, и импульсного осциллографа ОК-17 М, вход которого (на пластины) заранее калибровался. Типичная осциллограмма имела вид, приведенный на рис. 9. Измерялась амплитуда первого колебания; результаты измерений сведены в табл. 1; там же приведены результаты расчетов H по формуле (6).

Таблица 1

U , <i>кв</i>	I , <i>а</i>	$H_{\text{эсп}}$, <i>эрст</i>	$H_{\text{расч}}$, <i>эрст</i>
1,5	1300	6700	7250
2,0	1750	9000	9650
3,0	2600	13500	14500

Некоторое расхождение экспериментальных данных (погрешность измерения около 7%) с расчетными следует объяснить тем, что часть энергии конденсатора расходуется на создание магнитного поля в паразитной индуктивности контура, так как согласно измерениям коэффициент самоиндукции контура несколько превышает коэффициент самоиндукции магнитной катушки.

С помощью катушки, имеющей меньшие геометрические размеры ($2l \approx 40$ мм, $2a \approx 12$ мм, $N \approx 50$), на этой же схеме можно было получить при $U = 2,5$ кВ напряженность магнитного поля около 50 000 эрст.

В дальнейшем предполагается разряжать конденсатор через инитроны, управление которыми будет осуществляться специальной электронной схемой.

В заключение отметим, что с помощью сравнительно простой схемы, работающей на низком напряжении (до 3 кВ), вполне может быть решена задача создания импульсных магнитных полей напряженностью порядка нескольких десятков тысяч эрстед.

Если при этом частота повторения достигает 100 раз в секунду, то дальнейшее повышение напряженности магнитного поля при таких низких напряжениях невозможно без дополнительного охлаждения катушки. Это происходит благодаря сравнительно большой продолжительности импульсов — до сотен микросекунд (большие величины C). Уменьшить же продолжительность импульсов за счет уменьшения самоиндукции контура L практически затруднительно, ибо при этом увеличиваются токи в контуре и, следовательно, увеличиваются требования к коммутирующему устройству (способность пропускать токи в импульсе, превышающие 10^4 а). Однако в большинстве случаев в электровакуумной технике вполне достаточны магнитные поля напряженностью порядка 10^4 эрст.

§ 5. Импульсные магнитные поля напряженностью выше 10^5 эрст

Магнитные поля столь высокой напряженности представляют большой интерес для различного рода физических проблем. В частности, в последнее время такие поля применялись для исследования элементарных частиц как в камере Вильсона, так и на выходе ускорителей.

Как видно из формулы (6), при увеличении емкости конденсатора и напряжения разряда в небольшом объеме можно в принципе получить весьма большие значения напряженности магнитного поля. Однако уже в первых опытах Капицы и в последующих работах [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] были выявлены принципиальные трудности, с которыми приходится сталкиваться

в области полей свыше 10^5 эрст. В первую очередь сюда относится вопрос о механической устойчивости катушки, в которой создается магнитное поле такой напряженности, так как ponderomotive силы взаимодействия токов порядка сотен тысяч ампер достигают колоссальных значений. Для примера укажем, что при $H = 5 \cdot 10^5$ эрст давления в катушке достигают 7 т/см^2 .

Исследованию возникающих в катушке усилий посвящены многие работы [2, 11, 13]; детальные расчеты можно найти в статье Кокрофта [13]. Наибольшее значение имеют две силы — одна радиальная, направленная к внешней поверхности катушки, другая — аксиальная, стремящаяся сжать катушку в осевом направлении. Наибольших величин эти силы достигают во внутренних областях катушки. Результатом действия этих сил является разрушение изоляции между витками и течение металла (меди) по внутренней поверхности катушки, что приводит к замыканию витков. Поэтому, помимо различных устройств, укрепляющих катушку как целое, приходится прибегать к особо прочным сплавам для обмотки катушки и механически устойчивой изоляции. В последних работах [11, 12] в качестве проводника употреблялся сплав бериллия с медью, термически обработанный, и в качестве изолятора — слюда. Конечно, в связи с заменой меди на сплав нагрев катушки увеличивается, что в ряде случаев требует дополнительного охлаждения.

Характерной чертой основных работ по получению импульсных магнитных полей большой напряженности является применение больших емкостей (порядка нескольких тысяч микрофарад), разряжающихся при малых напряжениях (около 3 кВ). Катушки часто выполняются со сравнительно большим коэффициентом самоиндукции L . Все это приводит к относительно длинным импульсам магнитного поля (до сотен микросекунд и даже единиц миллисекунд) и к более жестким требованиям к устройству как в смысле механической прочности, так и в отношении охлаждения.

Очевидно, что при очень коротких импульсах (до десятка микросекунд) можно ожидать хорошей механической устойчивости катушки, обмотка которой выполнена даже из меди, вследствие упругих свойств материала при столь коротких воздействиях, а также меньшего нагрева ее. Эти преимущества быстрых разрядов могут компенсировать неудобства, связанные с применением малых емкостей и, следовательно, сравнительно высоких напряжений (порядка десятков киловольт).

Ниже излагаются предварительные результаты работы по получению весьма больших магнитных полей при высоковольтном разряде конденсаторов на катушку. Нами была проделана серия экспериментов со специальными катушками с малым коэффициентом самоиндукции при напряжениях разряда до 50 кВ и емкостях конденсаторов до 0,6 мкф.

Катушки первого типа для получения магнитных полей представляли собой однослойные соленоиды, намотанные „на ребро“ прямоугольной медной шиной $1,25 \div 1,5 \text{ мм} \times 3 \text{ мм}$. Внутренний диаметр катушек был $8-10 \text{ мм}$, а длина $20-25 \text{ мм}$. Число витков не превышало 14. Изоляция между витками осуществлялась слюдяными шайбами с разрезом, которые составляли двойную спираль, вложенную между медными витками. Такая конструкция катушек представляет особый интерес для проблемы больших импульсных полей благодаря повышенной механической устойчивости и сравнительной простоте изоляции между отдельными витками. Сходные по выполнению соленоиды применялись также и в работах [11, 12].

Приблизительная оценка индуктивности контура дает для L величину порядка 10^{-6} гн , при этом период колебаний должен составить единицы микросекунд. При таких частотах (порядка $5 \cdot 10^5 \text{ гц}$) поверхностный эффект ярко выражен, что приводит к значительному изменению как сопротивления и самоиндукции катушки (и контура), так и геометрического фактора S в формуле (5).

Если считать, что индуктивность остального контура составляет малую часть индуктивности катушки и приблизительно оценить величины, входящие в формулу (6), то ожидаемая величина магнитного поля в центре катушки, имеющей данные:

$N = 14$, $l = 1 \text{ см}$, $a_1 = 0,4 \text{ см}$, $a_2 = 0,7 \text{ см}$, при $C = 0,3 \text{ мкф}$ по порядку величины будет:

$$H [\text{эрст}] \approx 5,0 \text{ U} [\text{в}], \quad \text{при} \quad H/I \approx 8 \text{ эрст а.}$$

Экспериментальная схема была подобна той, которая изображена на рис. 8, с единственным отличием, заключающимся в том, что ввиду очень больших значений тока в импульсе вместо ignитрона коммутирующим элементом служил шаровой разрядник. Недостатком этой простейшей схемы являлось то, что за время разряда в контуре проходило до 6 колебаний с постепенно уменьшающейся амплитудой, интерес же представляет первое колебание. Естественно, это обстоятельство приводит к увеличению нагрева катушки, а также к усилению в ней механических напряжений.

Метод измерения магнитного поля был другой, так как шунты при таких быстрых колебаниях и большой величине проходящих в контуре токов трудно выполнить с точно рассчитанным сопротивлением (порядка тысячных долей ома). Для измерения поля применялась маленькая, тщательно выполненная измерительная катушка (рис. 10) с малым числом витков (до 10); напряжение с нее подавалось через делитель и через линию задержки на отклоняющие пластины импульсного осциллографа типа ОК-17 М. Измерительная катушка в специальной изоляции помещалась в центре соленоида.

Особую трудность при измерениях составляла проблема экранировки от наводок в цепи вывода катушки и делителя. Напряжение, индуцируемое в измерительной катушке, достигало тысячи вольт, так что единственно приемлемым вариантом оказался коаксиальный вывод достаточной протяженности, делитель же и выход линии задержки экранировался заземленным металлическим листом.

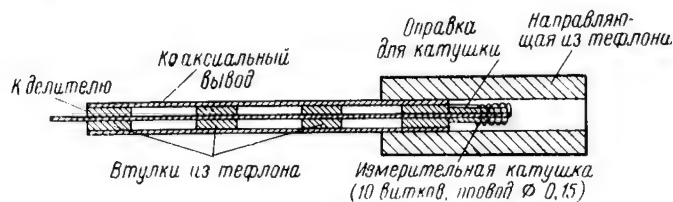


Рис. 10.

Геометрическая постоянная измерительной катушки nS (n — число витков, S — площадь поперечного сечения) равнялась $0,75 \text{ см}^2$. Тогда значение напряженности магнитного поля равнялось

$$H = \frac{10^8}{nS} \frac{EJ}{\omega} = 1,33 \cdot 10^8 \frac{EJ}{\omega};$$

здесь H — напряженность в эрстедах;

E — индуцированная в катушке ЭДС в вольтах;

ω — циклическая частота колебаний в контуре;

J — фактор, определяемый по формуле (6₂), который в нашем случае равнялся 0,98.

Результаты измерений напряженности магнитного поля при различных емкостях C и напряжениях разряда U сведены в табл. 2. Погрешность этих измерений достигала 6₀.

Таблица 2

$C, \text{ мкф}$	0,3			0,6	
$\omega, 1/\text{сек.}$	$1,25 \cdot 10^6$			$0,85 \cdot 10^6$	
$U, \text{ кв}$	24	36	45	24	45
$E, \text{ в}$	370	570	710	350	670
$H, \text{ эрст}$	39000	60000	76000	55000	105000

Как видно из таблицы, имеется большое расхождение между ожидаемым и действительным значением H — примерно в 3 раза. Это расхождение становится понятным, если оценить по осцилло-

грамме величину индуктивности контура L (сопротивление контура R также можно определить — оно приблизительно равно $0,3 \text{ ом}$). Индуктивность контура оказывается приблизительно равной $2,2 \text{ мкГн}$, в то время как индуктивность самой катушки всего около $0,5 \text{ мкГн}$. Так как коэффициент самоиндукции соединительных шин невелик — составляет доли микрогенри, то следует считать, что самоиндукция обкладок конденсаторов составляет величину порядка $1,5 \text{ мкГн}$, т. е. в три с лишним раза превышает значение коэффициента самоиндукции катушки. Таким образом, энергия, расходуемая в катушке на создание искомого магнитного поля, приблизительно в четыре с половиной раза меньше полной энергии, выделяемой в контуре при разряде конденсаторов, что и приводит к уменьшению величины наблюдаемого магнитного поля. Ввиду этого возникла необходимость либо построения катушек с большим коэффициентом самоиндукции, либо уменьшения внутренней самоиндукции конденсаторов. Так как в нашем распоряжении не было такого рода конденсаторов, то была предпринята попытка использования катушек с коэффициентом самоиндукции до 3 мкГн . Увеличение коэффициента самоиндукции достигалось путем увеличения числа витков на единицу длины при сохранении основных геометрических размеров (эффективный объем, в котором создавалось магнитное поле, оставался тем же, что и в описанных выше катушках с малой индуктивностью). В частности, была испытана катушка со следующими параметрами: $N = 32$, $l = 0,95$, $a_1 = 0,4$, $a_2 = 0,6$. Коэффициент самоиндукции составлял для нее 3 мкГн . При разряде конденсатора емкостью $0,1 \text{ мкФ}$ при напряжении 18 кВ измеренное значение магнитного поля составило около 34000 эрст , ожидаемое же значение — около 55000 эрст . Расхождение этих величин согласуется с тем фактом, что индуктивность контура составляла величину $6,25 \text{ мкГн}$.

Эксперименты с этими катушками показали, что возникают трудности междувитковой изоляции при напряжении разряда, превышающем $15\text{—}20 \text{ кВ}$, применение же больших по толщине слюдяных прокладок увеличивает длину катушки. Ввиду этого, а также вследствие необходимости увеличения коэффициента самоиндукции катушки до величины порядка 10 мкГн мы пришли к заключению, что дальнейшее увеличение напряженности импульсного магнитного поля продолжительностью до 50 мксек может быть достигнуто при работе с конденсаторами емкостью порядка десятка микрофард при напряжении разряда $10\text{—}15 \text{ кВ}$. При этом особое внимание должно быть обращено на уменьшение паразитной индуктивности контура, — в основном обкладок конденсаторов.

Заключение

В результате проведенной работы установлена возможность фокусировки электронных потоков в электровакуумных прибо-

рах, работающих в импульсном режиме, магнитным полем, полученным в соленоидах, питаемых переменным током промышленной частоты, что значительно упрощает питание фокусирующих устройств.

Разработана установка, позволяющая получать при помощи соленоидов без сердечников из ферромагнетиков подобного рода магнитные поля напряженностью до 23000 *эрс* с частотой повторения 50—100 раз в секунду. Применение этих полей для питания специальных электровакуумных приборов дало хорошие результаты.

Установлена принципиальная возможность питания электровакуумных приборов, работающих в импульсных режимах, импульсными магнитными полями, что значительно снижает расход энергии, потребляемой устройствами, создающими магнитные поля, а также габариты и вес этих устройств.

Разработана установка, позволяющая получать импульсные магнитные поля в соленоидах диаметром 40 *мм* напряженностью до 14000 *эрс* и в соленоидах диаметром 15 *мм* до 50 000 *эрс* с частотой следования импульсов до 10 *гц*.

Получены импульсные магнитные поля напряженностью $\approx 100\,000$ *эрс*, которые могут быть использованы при решении различного рода физико-технических и физических проблем.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. П. Капица, Proc. Roy. Soc., A, т. 105, 691, 1924.
2. П. Капица, Proc. Roy. Soc., A, т. 115, 658, 1927.
3. T. Wall, J. Inst. Electr. Eng., т. LXIV, 64, 409, 1926.
4. W. de Haas and J. Westerdijk, Nature, 1958, 271, 1946.
5. G. Raoult, Ann. Phys. Paris, т. 4, 369, 1949.
6. K. Champion, Proc. Phys. Soc. B., т. 63, 795, 1950.
7. J. K. Olsen, Phys. Acta., т. 26, 798, 1953.
8. Myers, J. Sci. Instr., т. 30, 237, 1953.
9. Ince, Proc. Inst. Electr. Eng. Ptc, 102, 25, 1955.
10. A. Plekarc, J. Malecki, M. Surma, J. Gibalewicz, Proc. Phys. Soc. B, т. 70, 4, 1957.
11. H. Furfh and R. Waniek, Rev. Sci. Instr., т. 27, 195, 1956.
12. H. Foner and H. Kolm, Rev. Sci. Instr., т. 27, 547, 1956.
13. J. Cockroft, Trans. Roy. Soc. A, т. 227, 317, 1928.
14. Цейтлин, Индуктивность проводов и контуров, Госэнергоиздат, 1950.

*Доктор техн. наук проф. К. И. КРЫЛОВ,
инженер К. С. РОЖНОВ*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА

§ 1. Введение

Экспериментальное исследование электрических и магнитных полей оказывает существенную помощь при конструировании различного рода электротехнической и радиотехнической аппаратуры, а также при разработке и конструировании электровакуумных приборов. С этой целью в ЛЭТИ на кафедре теории электромагнитного поля в течение нескольких лет разрабатывались методы исследования различного рода полей. Некоторые результаты этих работ в свое время были опубликованы в статьях, помещенных в известиях ЛЭТИ [1, 2]. В них изложены работы, произведенные в области исследования электрических полей как в однородных, так и в неоднородных средах.

Особенно большое значение при конструировании электровакуумных приборов имеет исследование электрических полей при наличии пространственного заряда ($\rho \neq 0$), так как в подавляющем большинстве случаев работа тех или других электровакуумных приборов осуществляется при наличии в нем электронного или ионного облака.

Существует ряд методов, с помощью которых аналитически или экспериментально можно определить электростатическое поле при наличии пространственного заряда, т. е. получить решение уравнения Пуассона при граничных условиях, удовлетворяющих условиям, существующим в том или другом электровакуумном приборе.

Среди теоретических методов наиболее простым является графоаналитический метод [3], однако он дает только качественное представление о влиянии пространственного заряда и не может обеспечить необходимой точности при определении траекторий электронов.

Заслуживает внимания аналитический метод корректирования пространственного заряда [4], но он весьма трудоемок и вследствие этого не может найти широкого практического применения.

Экспериментальное исследование электрических полей чаще всего осуществляется при помощи электролитической ванны с применением метода Пирса [5, 6] для подбора формы электро-

дов электронно-оптических систем. К сожалению, этот метод применим только для прямолинейных пучков.

Метод резиновых мембран [7] позволяет исследовать только плоскопараллельные поля.

Заслуживает внимания метод рельефного дна [8], но он требует большого времени для промежуточных расчетов и имеет значительные трудности в изготовлении рельефа дна.

Нам представляется наиболее приемлемым для практических целей метод, предложенный В. С. Лукошковым, заключающийся в моделировании пространственного заряда в электролитической ванне путем введения в электролит токов, пропорциональных плотности пространственного заряда [9].

В лаборатории радиотехнической электроники была сконструирована специальная установка и разработана методика, позволяющие экспериментально исследовать в сравнительно короткое время и с приемлемой для практических целей точностью, электростатические поля при наличии пространственного заряда.

В настоящей статье сообщаются результаты работ, произведенных в данном направлении.

§ 2. Теоретическое обоснование метода

Исследование электростатических полей в данном методе производится с помощью электролитической ванны, причем электрическое поле в вакууме представляется полем токов в электролитической ванне.

Пространственные заряды в вакууме являются источниками силовых линий, причем плотность источников электрических силовых линий определяется плотностью пространственных зарядов в данном месте.

Электрические силовые линии в электролите совпадают с линиями токов.

Если в дно электролитической ванны будет впаяно большое число металлических штырей, то, вводя в электролит через штыри токи от независимого источника питания, мы образуем в электролите источники линий тока, т. е. источники электрических силовых линий, и, таким образом, мы можем токами в электролите имитировать пространственный заряд в вакууме.

Как известно, электростатическое поле в вакууме определяется следующими основными уравнениями:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= 0, \quad \vec{E} = -\operatorname{grad} U, \quad \operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho, \\ \Delta^2 U &= -4\pi\rho, \end{aligned} \quad (1)$$

где

\vec{E} — напряженность электрического поля;
 U — электростатический потенциал;
 ρ — плотность пространственного заряда.

Электрическое поле токов в электролите определяется соотношениями:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0, \quad \vec{E} = -\operatorname{grad} V, \quad \vec{\delta} = \gamma \vec{E}, \quad \operatorname{div} \vec{\delta} = i, \\ \Delta^2 V = -\frac{i}{\gamma}, \quad (2)$$

где

i — плотность источников линий тока,
 \vec{E} — напряженность электрического поля в электролите;
 V — потенциал;
 $\vec{\delta}$ — плотность тока,
 γ — коэффициент электропроводности.

Принимая во внимание аналогичность уравнений (1) и (2), нетрудно установить, какой величины токи должны быть заданы на штыри, чтобы электрическое поле в ванне совпало с полем электростатическим при наличии пространственного заряда.

Коэффициент подобия, определяющий отношение ρ к i , будет равняться

$$k = \frac{i}{\rho} = \frac{4\pi\gamma V l^2}{UL^2}, \quad (3)$$

где L и l — геометрические размеры, характеризующие данную систему в электролите и в вакууме.

Для случая трехмерного поля, т. к. $\rho = \frac{Q_i}{l^3}$, а $i = -\frac{I_i^{\text{III}}}{L^3}$, коэффициент подобия, определяющий соотношение между током, вводимым электролит при помощи штыря в i -ую элементарную ячейку, и зарядом, находящимся в соответствующей ячейке поля в вакууме, будет равен

$$k = \frac{I_i^{\text{III}}}{Q_i} = \frac{4\pi\gamma V}{U} \frac{L}{l}. \quad (4)$$

Таким образом, для того чтобы снять картину поля, надо задать токи на штыри в соответствии с формулой (4), следовательно, надо знать распределение пространственного заряда между электродами, так как

$$Q_i = \rho \Delta v_i, \quad (5)$$

где

Δv_i — объем элементарной ячейки.

Однако практически эта величина бывает неизвестна, ввиду этого съемка картины поля производится методом последовательных приближений.

Прежде всего снимается картина электрического поля при отсутствии токов на штыри, т. е. определяется поле заданной конфигурации электродов, которое имеет место при отсутствии пространственного заряда. Впоследствии это поле мы будем называть нулевым приближением. По картине поля строят траектории электронов, разбив затем все пространство между электродами на трубки тока и элементарные ячейки; находят в относительной мере

плотность заряда в каждой ячейке, задав в исследуемом электровакуумном приборе произвольные значения тока между электродами I_0 . В соответствии с этим задаются токи на штыри и имитируется пространственный заряд. Однако, как известно, ток в электровакуумном приборе, если не учитывать начальных скоростей электронов, всегда имеет такую величину, при которой напряженность электрического поля на катоде равняется нулю. Поэтому далее изменяют пропорционально токи на все штыри до тех пор, пока поле около электрода в ванне, имеющего отрицательный потенциал, не будет равно нулю. После этого снимают снова картину электрического поля (первое приближение). Однако полученная картина поля не будет еще соответствовать тому полю, которое на самом деле имеет место в электровакуумном приборе. Это происходит потому, что при построении траекторий мы исходим из предположения, что поле в вакуумном приборе, под влиянием которого движутся электроны, такое, какое было бы, если бы в лампе не было пространственного заряда. Поэтому далее по картине поля первого приближения строятся снова траектории электронов, снова определяется плотность пространственного заряда в каждой ячейке при произвольном токе, поле на катоде приводится к нулю и снова снимается картина поля (второе приближение). Эта картина уже ближе будет соответствовать действительности, однако и она еще не будет представлять собой истинное поле, имеющее место в электровакуумном приборе, так как в этом случае мы считаем, что электроны движутся под влиянием поля, которое существовало бы, если бы распределение потенциала в лампе соответствовало первому приближению. Поэтому далее снова производится построение траекторий и снятие картины поля (третье приближение) и т. д. При этом каждая следующая операция приближает все больше и больше к истинному распределению поля. Снятие картин производится до тех пор, пока картины начинают совпадать.

Для иллюстрации того, каким образом и в какой мере осуществляется в процессе указанного рода действий приближение к истинному полю, нами был произведен расчет распределения потенциала в лампе с плоской конструкцией электродов для случая первого, второго и третьего приближений.

Как было указано, при первом приближении допускается, что электроны в лампе движутся в таком поле, которое соответствует отсутствию пространственного заряда, т. е. в поле с распределением потенциала, удовлетворяющим уравнению

$$U = U_0 \left(\frac{x}{d} \right). \quad (6)$$

Таким образом, скорость электронов v в точке, где потенциал U , равняется

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{e}{m}} \sqrt{\frac{U_0}{d}} x^{1/2}. \quad (7)$$

Тогда из уравнения

$$\delta = \rho v$$

вытекает, что

$$\rho = \frac{\delta x^{-1/2}}{1/2 \sqrt{\frac{e}{m}} \sqrt{\frac{U_0}{d}}}. \quad (8)$$

С другой стороны,

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -4\pi\rho. \quad (9)$$

Из (8) и (9) находим путем интегрирования, учитывая, что поле на катоде равно нулю,

$$E = \frac{8\pi}{1/2} \cdot \frac{\delta}{\sqrt{\frac{e}{m}} \sqrt{\frac{U_0}{d}}} x^{1/2}. \quad (10)$$

Откуда, так как

$$E = -\frac{\partial U}{\partial x}$$

и, принимая во внимание, что при $x=0$ $U=0$, получаем

$$U = \frac{2}{3} \frac{8\pi\delta}{1/2} \sqrt{\frac{m}{e}} \sqrt{\frac{d}{U_0}} x^{3/2}. \quad (11)$$

Таково распределение потенциала в лампе при плотности тока δ и сделанном приближении о скорости электронов.

Так как при $x=d$ U должно равняться U_0 , из (11) следует, что это распределение потенциала будет при токе

$$\delta = \frac{3}{16\pi} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{1}{d^2} U_0^{3/2}, \quad (12)$$

следовательно, при потенциале анода U_0 распределение потенциала в лампе будет

$$U = U_0 \left(\frac{x}{d} \right)^{3/2}. \quad (13)$$

Таким образом, при приближении, выражающемся в определении скорости электронов не через фактически существующий потенциал, а через потенциал, который имеет место при отсутствии пространственного заряда, распределение потенциала в лампе описывается не обычной формулой, вытекающей из формулы Лапмюра

$$U = U_0 \left(\frac{x}{d} \right)^{3/2}, \quad (14)$$

а формулой (13).

Следующее приближение находится в предположении, что скорость электронов определяется через потенциал, определяемый формулой (13). В этом случае

$$\rho = \frac{\delta d^{3/4} x^{-3/4}}{\sqrt{2} \sqrt{\frac{e}{m}} \sqrt{U_0}} = -\frac{\partial E}{\partial x}, \quad (15)$$

$$E = \frac{4}{\sqrt{2}} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{e}{m}}} \frac{d^{3/4}}{\sqrt{U_0}} x^{1/4} \quad (16)$$

и

$$U = \frac{16\delta d^{3/4} x^{5/4}}{5 \sqrt{2} \sqrt{\frac{e}{m}} \sqrt{U_0}}. \quad (17)$$

Так как при $x = d$ $U = U_0$, то

$$\delta = \frac{U_0 5 \sqrt{2} \sqrt{\frac{e}{m}} \sqrt{U_0}}{16 d^2}. \quad (18)$$

Подставив значение тока в (17), находим

$$U = U_0 \left(\frac{x}{d} \right)^{5/4}. \quad (19)$$

Следующее приближение находится в предположении, что скорость определяется потенциалом, имеющим место в соответствии с (19). Произведя аналогичные вычисления, приходим к заключению, что

$$U = U_0 \left(\frac{x}{d} \right)^{11/8}. \quad (20)$$

Результаты вычислений приведены на рис. 1. Кривая 1 показывает распределение потенциала при отсутствии пространственного заряда, кривая 3 — распределение потенциала при первом приближении, кривая 4 — второе приближение в соответствии с формулами (13) и (19). Там же нанесена кривая 2 распределения потенциала, имеющего место в действительности — формулу (14). Из рисунка видно, как осуществляется приближение по мере уточнения результата. Третье приближение — формула (20) — на графике не нанесено, так как практически кривая при этом совпадает с кривой, описывающей истинное распределение потенциала.

Помимо рассмотренного выше способа получения картины поля при наличии пространственного заряда, который может быть назван способом приведения к нулю поля у катода, возможно также решение задачи и несколько иным методом.

В этом случае после построения траекторий электронов в поле, соответствующем отсутствию пространственного заряда, для определения плотности вводимых в электролит токов, плотность тока у катода для каждой трубки принимается равной тому значению, которое получается при вычислении по формуле Лангмюра для

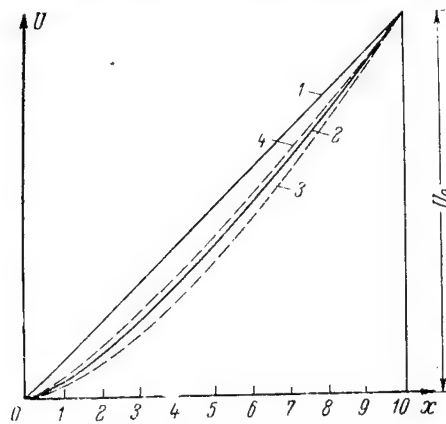


Рис. 1. Распределение потенциала между параллельными плоскостями.

1 — при отсутствии пространственного заряда;
2 — при пространственном заряде, соответствующем току, определяемому по закону степеней трех вторых; 3 — первое приближение;
4 — второе приближение.

случая плоского конденсатора. При этом расстояние d принимается равным расстоянию от катода до первой определенной экспериментально эквипотенциали, величина же потенциала соответствует его значению на этой эквипотенциали.

После задания токов на штыри снимается картина поля обычным способом, по ней снова определяют плотность тока у катода ρ как функцию координат, вводимые в электролит токи и т. д. Как и при первом методе, построение картин производится до тех пор,

пока практически картины поля не будут совпадать.

Для иллюстрации работы прибора на рис. 2 и 3 приведены кривые зависимости

$$\frac{U_x}{U_0} = f\left(\frac{x}{d}\right) \text{ и } \frac{U_x}{U_0} = f\left(\frac{r_k}{r}\right),$$

полученные нами для плоского и кругового цилиндрического конденсаторов.

На электролитической ванне со штырями могут быть исследованы плоскопараллельные и аксиально-симметричные поля.

В случае исследования плоскопараллельных полей дно ванны должно быть параллельно горизонтальному уровню воды; при исследовании аксиально-симметричных полей (электроды представляют собой поверхности вращения) дно ванны должно быть наклонено относительно уровня воды, причем ребро клина электролита представляет собой ось вращения (ось Z цилиндрической системы координат) исследуемого поля.

Благодаря последовательным зеркальным отражениям в изолирующем дне ванны и горизонтальной поверхности электролита, дополнение электрического поля происходит обычным способом. Одновременно с полем отражаются также проводящие штыри,

которые в результате бесконечных последовательных отражений образуют пространственную сетку, благодаря чему моделируемый заряд оказывается распределенным в пространстве.

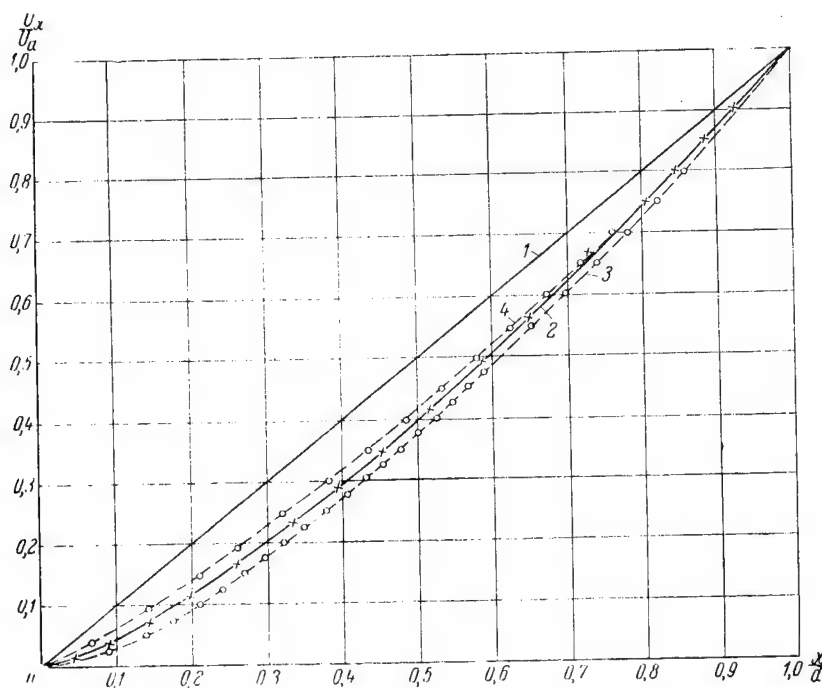


Рис. 2. Зависимость $\frac{U_x}{U_0} = f\left(\frac{x}{d}\right)$ для поля плоскостных электродов
1 — при отсутствии пространственного заряда; 2 — при пространственном заряде, соответствующем току, определяемому по закону степени трех вторых; 3 — первое приближение; 4 — второе приближение; крестиками обозначено третье приближение.

§ 3. Описание установки

Получение картин электростатического поля при наличии пространственного заряда в вакууме производилось путем снятия картин поля токов в электролитической ванне размером $1400 \times 960 \times 145$ мм.

Электролитическая ванна выполнена из органического стекла. Для придания необходимой жесткости ванна установлена в сварной каркас из стальных уголков. Каркас имеет регулировочные винты, которые позволяют осуществлять наклон ванны для получения клина электролита, что необходимо при исследовании аксиально-симметричных полей (рис. 4).

В дно ванны вмонтированы с помощью растворенного в дихлорэтано органического стекла 2740 штырьков из никелевой

проволочки $\varnothing 0,8$ мм. В тех участках ванны, где предполагается помещать катод и ускоряющий электрод моделируемых электровакуумных приборов, никелевые штырьки отстоят друг от друга на расстоянии 12 мм (2260), в остальной рабочей поверхности ванны расстояние между ними равняется 25 мм (480 штук). Каждый штырь в дне ванны электрически соединен с соответствующим ему гнездом на распределительном щите ванны, набранном из телефонных рамок.

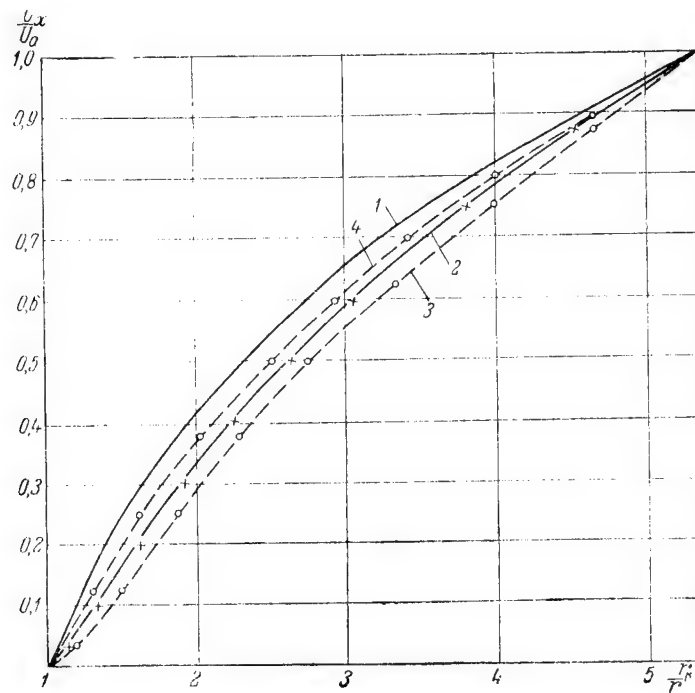


Рис. 3. Зависимость $\frac{U_x}{U_0} = f\left(\frac{r_k}{r}\right)$ для поля круговых цилиндрических электродов

1—при отсутствии пространственного заряда; 2—при пространственном заряде, соответствующем току, определяемому по закону степени трех вторых; 3—первое приближение; 4—второе приближение; крестиками обозначено третье приближение.

Расположение гнезд на распределительном щите представляет собой геометрическое подобие расположения штырей в дне ванны (рис. 5), что облегчает нахождение нужных гнезд (штырей) при работе с ванной.

Распределительный щит установлен на сварном каркасе ванны; здесь же установлены: механизм перемещения зонда и магазины сопротивлений измерительного моста. Верхняя часть каркаса, к которой крепится листовое стекло в раме, служит записываю-

щим столом, на котором с помощью пружинных планок закрепляется лист миллиметровой или чертежной бумаги.

Устройство зонда и его механизма перемещения можно видеть из рис. 6 и рис. 7. Основной зонд 9 изготовлен из вольфрамовой проволоки $\varnothing 1$ мм, заточенной на острие и вмонтированной с помощью полистироловой втулочки 8 в латунную трубку 3. Зонд вместе с латунной трубкой имеет регулировку по высоте, благодаря чему можно регулировать глубину его погружения

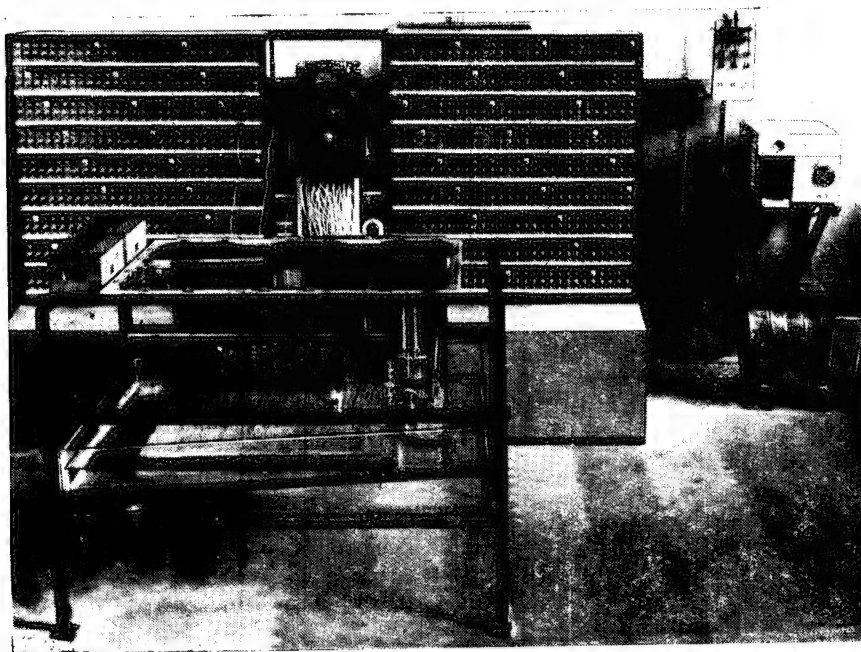


Рис. 4. Общий вид установки.

в электролит. На латунной трубке укреплен вспомогательный зонд 10 (вольфрамовая проволока $\varnothing 0,8$ мм) для измерения напряженности поля, который при измерениях потенциала основным зондом переводится в нерабочее положение. Зонды в строго определенном положении крепятся на диске из органического стекла 4, который установлен на основании каретки 5. На одной оси с зондами на диске установлены два точечных источника света 2, которые с помощью объективов 1 дают световые точки на листе бумаги, закрепленной на записывающем столе.

При измерениях напряженности поля вспомогательный зонд (вместе со всем устройством, размещенным на изолирующем диске) можно вращать относительно основного зонда посредством

червячной передачи 6, 7. Вращение производится маховичком, вынесенным для удобства работы за борт ванны.

Перемещение основного зонда в продольном и поперечном направлениях осуществляется с помощью большой и малой кареток по калиброванным стальным осям $\varnothing 25$ мм и $\varnothing 22$ мм. Продольные оси закреплены жестко в раме каркаса ванны; малые оси устанавливаются на второй (большой) каретке.

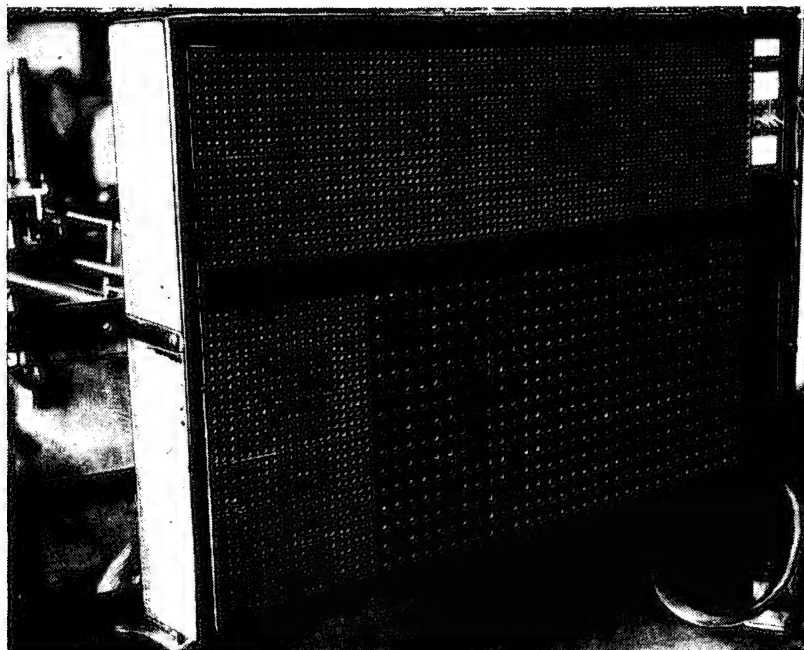


Рис. 5. Распределительный щит ванны.

Перемещение кареток по осям осуществляется на шарикоподшипниках с помощью фрикционных. Шарикоподшипники посажены на эксцентричные оси, благодаря чему возможна их регулировка. Трение фрикционной передачи можно регулировать поджиманием резинового кольца фрикциона специальным винтом.

Для удобства работы с ванной все маховички перемещения зонда вынесены за борт ванны и расположены рядом друг с другом.

Описанная конструкция механизма перемещения зонда позволяет плавно и с большой точностью осуществлять его перемещение.

Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 8, где

- R_1 и R_2 — магазины сопротивлений измерительного моста;
 R_4 — потенциометр, для задания напряжения на дополнительных электродах;
 ИНО — 3 — индикатор нулевого отсчета;
 ЛВ — ламповый вольтметр;
 R_3 — высокоомные переменные сопротивления для установки тока, вводимого в электролит через штыри;
 R_0 — измерительное сопротивление;
 C_1 и C_2 — переменные конденсаторы для компенсации емкостной составляющей;
 R_3 — низкоомное сопротивление;
 З — зонд.

Устройство для дозирования и измерения тока, вводимого в электролит, смонтировано на двух щитах (1185 × 1250 × 5 мм) из изолирующего материала, закрепленных в каркасе стенда и представляющих его лицевую сторону (рис. 4). Каждый элемент дозирующего устройства представляет собой последовательное включение трех переменных высокоомных сопротивлений R_3 и одного измерительного сопротивления УЛИ-0,25 R_0 . Установка вводимых в электролит токов осуществляется высокоомными переменными сопротивлениями R_3 . Падение напряжения на измерительном сопротивлении R_0 , пропорциональное току, вводимому в электролит через штырь, измеряется одним и тем же ламповым вольтметром во всех элементах дозирующего устройства.

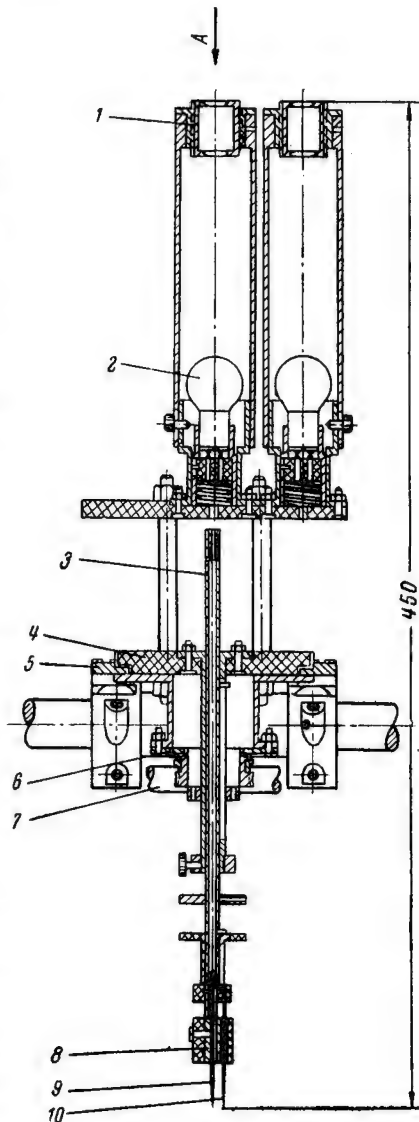


Рис. 6. Зондирующее устройство ванны.

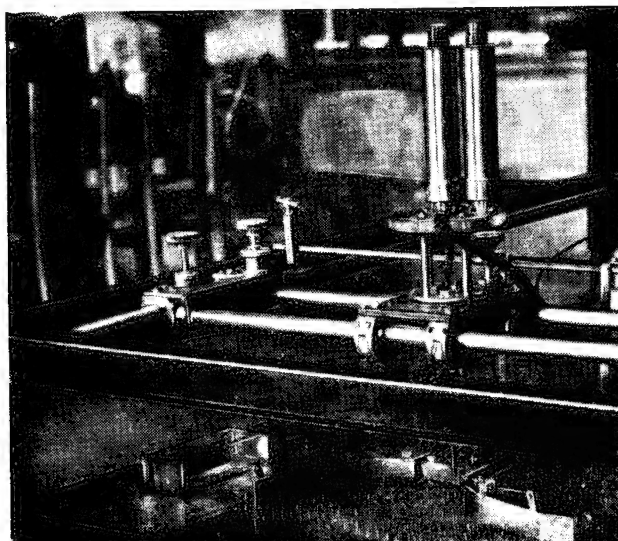


Рис. 7. Общий вид зондирующего устройства.

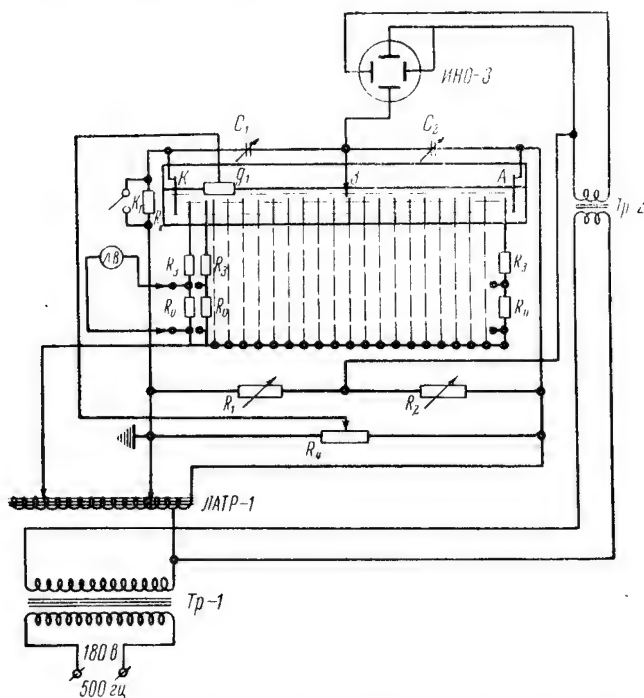


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема установки.

Каждый элемент дозирующего устройства имеет соответствующее ему гнездо на распределительном щите дозирующего устройства и может быть скоммутирован с помощью штекеров и распределительного щита ванны на любой штырь в ванне.

Ламповый вольтметр и индикатор нулевого отсчета размещаются на стенде (рис. 4).

Питание электрической схемы осуществляется от преобразователя ($U=180$ в; $H=500$ гц) через понижающий трансформатор и вариак. Преобразователь имеет блок управления, в котором размещены пусковое устройство и автоматическая регулировка напряжения.

§ 4. Исследование поля электронной пушки

Описанная в § 3 установка позволяет экспериментально исследовать электростатическое поле электронно-оптических систем при наличии пространственного заряда.

Методика исследования полей была нами изложена в § 2.

Вводимый в электролит ток (I_i^w), моделирующий пространственный заряд в элементарном объеме Δv_i , определяется следующим образом:

$$I_i^w = kQ_i = k\rho_i\Delta v_i, \quad (21)$$

где

Q_i — заряд элементарного объема Δv_i .

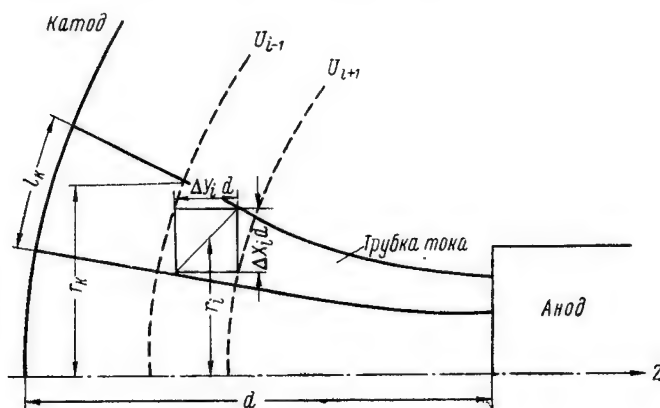


Рис. 9. Элементарная ячейка аксиально-симметричного поля.

Плотность пространственного заряда в некоторой точке объема Δv_i , взятого в некоторой трубке тока (рис. 9), может быть определена как

$$\rho_i = \delta_i \frac{1}{\sqrt{\frac{2e}{m}} \sqrt{U_i}} = \delta_k \left(\frac{S_k}{S_i} \right) \frac{1}{\sqrt{\frac{2e}{m}} \sqrt{U_i}}, \quad (22)$$

где

δ_k и δ_i -- соответственно, плотность тока на катоде и в рассматриваемом сечении трубки тока (S_i).

В случае аксиально-симметричного поля, учитывая, что

$$\Delta v_i = \Delta x_i d \Delta y_i d r_i \Delta \Theta,$$

$$S_k = l_k r_k \Delta \Theta, \quad S_i = l_i r_i \Delta \Theta,$$

а

$$k = \frac{4\pi\gamma V R_k}{U r_k}$$

формулу для тока, вводимого в электролит, можно представить в виде

$$I_i^u = 4\pi\gamma\delta_k \left(\frac{V}{U}\right) \left(\frac{L_k}{L_i}\right) \frac{1}{\sqrt{\frac{2e}{m}} \sqrt{U_i}} d^2 \Delta x_i \Delta y_i R_k \Delta \Theta. \quad (23)$$

Если распределение электрического поля и плотность тока на катоде найдется приведением к нулю поля у катода, то выражение (23) можно привести к виду

$$I_i^u = C \frac{1}{\sqrt{U_i}} \left(\frac{L_k}{L_i}\right) R_k \Delta x_i \Delta y_i, \quad (24)$$

где все постоянные величины и величины, подбираемые по условию равенства нулю поля у катода, сведены в постоянную C .

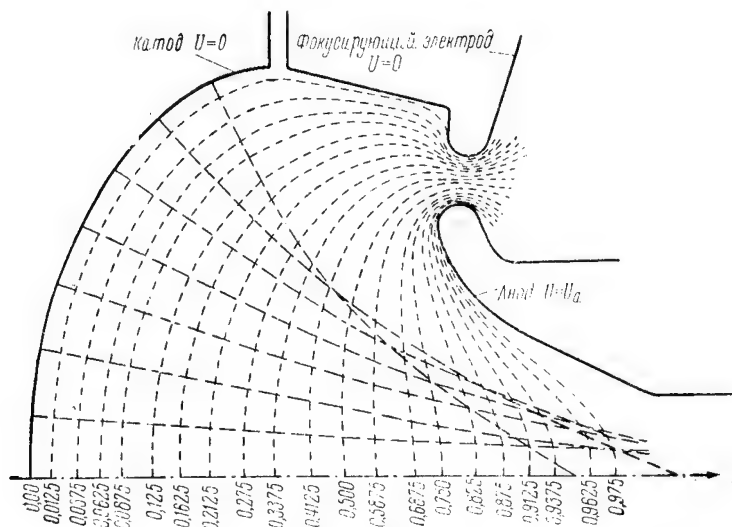


Рис. 10. Электрическое поле и траектории электронов электронной пушки; поле и траектории в отсутствии пространственного заряда.

На рис. 10, 11 и 12 в качестве примера приведено распределение электрического поля и траектории электронов в одной из

электронно-оптических систем с экспериментально подобранными конфигурацией и расположением электродов.

На рис. 10 даются: картина электрического поля и траектории электронов без учета пространственного заряда, на основе которых рассчитывается плотность пространственного заряда ρ как функция координат (нулевое приближение) и пропорциональные ей токи, вводимые в электролит.

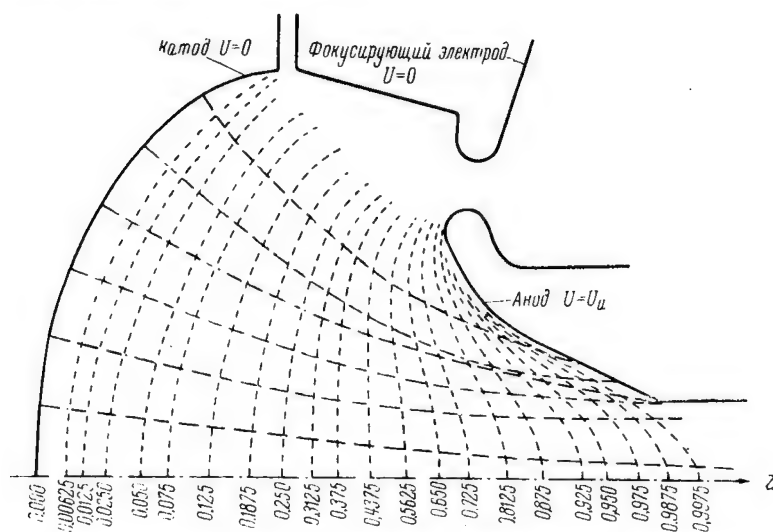


Рис. 11. Электрическое поле и траектории электронов электронной пушки; первое приближение.

На рис. 11 приведены: картина поля и траектории электронов, учитывающие в первом приближении пространственный заряд (в электролит вводятся токи, пропорциональные ρ нулевого приближения).

На рис. 12 изображены: картина поля и траектории электронов во втором приближении (вводимые в электролит токи рассчитываются по плотности пространственного заряда, определяемой по картине электрического поля в первом приближении (рис. 11)).

Из приведенных рисунков видно, что траектории электронов, если не учитывается влияние пространственного заряда (рис. 10), в значительной мере пересекаются еще до выходного отверстия электронно-оптической системы и образуют затем расходящийся пучок. Влияние пространственного заряда сказывается на расталкивании электронного пучка. Как видно из рис. 11, это расталкивание при больших плотностях токов столь значительно, что траектории многих электронов, не пересекая оси, оканчиваются на аноде системы. Однако полученная в первом прибли-

жении картина, как было указано ранее, преувеличивает влияние пространственного заряда, фактически расталкивание в электронном пучке происходит менее интенсивно, и, как видно из рис. 12, при втором приближении электроны собираются в соответствии с поставленной задачей в параллельный пучок диаметром в 5 раз меньшим диаметра катода. Дальнейшие построения картин поля и траекторий третьего и четвертого приближений, уточняя картину, не вносят существенных изменений.

Съемка картины поля производилась на описываемой в § 3 установке. Траектории электронов строились графоаналитическим методом (методом парабол). Электроды моделирующей системы

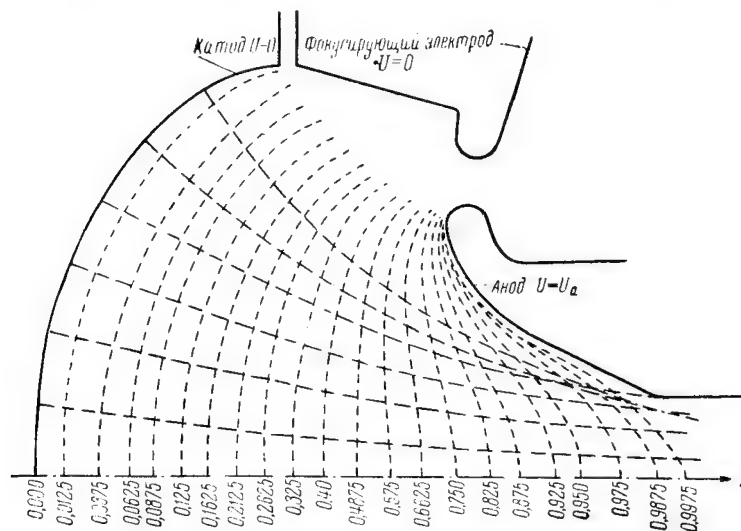


Рис. 12. Электрическое поле и траектории электронов электронной пушки; второе приближение.

изготавливались из листового никеля и тщательно обезжиривались. Установка электродов производилась по вырезанному из плотной чертежной бумаги шаблону, который накалывался на штыри ванны. В качестве электролита применялся слабый раствор NaCl в воде; предусматривались меры по поддержанию постоянной температуры электролита.

В заключение заметим, что при большой проводимости электролита картина поля может искажаться за счет переходного сопротивления между металлическим электродом и электролитом. На величину переходного сопротивления большое влияние оказывает пленка окиси, образующейся на поверхности металлических электродов. Если применять электроды, изготовленные из листового железа, то на их поверхности образуется хорошо проводящая пленка, и влияние переходного сопротивления снижается. Однако

при продолжительной работе железные электроды изменяют неоднородно проводимость электролита и тем самым вносятся значительная погрешность при съемке картины электрического поля.

При работе с электродами, изготовленными из листового никеля, и с электролитом малой проводимости (водопроводная вода или слабый раствор NaCl в воде), переходное сопротивление Ni —электролит не искажает заметно картины поля; межэлектродные емкости в значительной мере удается компенсировать переменными конденсаторами C_1 и C_2 .

Значительную погрешность при съемке поля на оси моделируемой системы может внести мениск у ребра клина электролита, моделирующего ось системы, образуемый в результате сил поверхностного натяжения электролита. Чтобы избежать погрешности за счет мениска, ось симметрии моделируемых систем нанесена на дне ванны в виде неглубокой царапины. При установке оси электролит сначала переливается за нанесенную линию, а затем увеличением угла наклона ванны медленно отводится за нее; за счет сцепления электролита с линией можно получить достаточно хороший клин электролита.

Картина поля может искажаться за счет шунтирующего действия цепочек дозирующих сопротивлений. При подаче на дозирующие сопротивления напряжения, в $15 \div 20$ раз превышающего напряжение, приложенное к электродам, искажения снимаемой картины поля не происходит. Влияние стенок ванны (размеры ванны $1400 \times 960 \times 145$ мм) и процессов поляризации электродов ($H = 500$ гц) не вносят заметных искажений в картину поля.

Погрешности при расчете величин токов, вводимых в электролит, и при их задании незначительны. Основная погрешность в получаемых результатах возникает при графоаналитическом построении траекторий заряженных частиц.

Таковы основные погрешности данного метода. Однако окончательные результаты, полученные при помощи описанной в данной статье установки, вполне приемлемы для практических целей.

Установка позволила рассчитать и спроектировать ряд электронно-оптических систем, которые после изготовления дали хорошее согласие с техническими заданиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Крылов, Я. П. Ковалевская, Известия ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), выпуск XXIV, 1951.
2. К. И. Крылов, Я. П. Ковалевская, Известия ЛЭТИ им. В. И. Ульянова (Ленина), выпуск XXX, 1956.
3. Д. Ж. Брюер, Проблемы современной физики, № 6, 1956.
4. D. Charl, Anales de radioelectricite, т. IV, № 15, 1949.

5. Дж. Р. Пирс, Теория и расчет электронных пучков, Изд. „Советское Радио“, 1956.

6. К. Р. Шпангенберг, Электронные лампы, Изд. „Советское Радио“, 1954.

7. Б. В. Бобыкин, В. М. Кельман, Д. Л. Каминский, ЖТФ, т. 22, стр. 736, 1952.

8. R. Musson — Genon, *Londe electrique*, vol 28, № 225, 1948.

9. В. С. Лукошков, Парижская конференция по Радиоэлектронике, 1956,

Ассистент С. И. МОЛОКОВСКИЙ

ОЦЕНКА РАСФОКУСИРУЮЩИХ СИЛ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА В КЛИСТРОНЕ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

§ 1. Введение

В многочисленных работах, посвященных различным вопросам фокусировки мощных электронных потоков в лампах СВЧ, анализ фокусировки ограничивается рассмотрением статического режима прибора. При этом, естественно, не учитывается влияние на фокусировку электрических полей, которые возникают в условиях динамического режима. К таким полям следует отнести как высокочастотные поля, возникающие при возбуждении резонаторной (замедляющей в ЛБВ) системы, так и поля, обусловленные перераспределением объемного заряда в процессе группирования электронного потока. Действие этих полей может привести к заметной дефокусировке электронного потока и существенно повлияет на эффективность работы лампы в целом. Можно указать лишь несколько работ, в которых дан некоторый материал, относящийся к вопросу расфокусирующего действия таких полей. Так, в работе Иперена [1] указывается на уменьшение эффективности работы клистрона за счет расфокусирующего действия высокочастотного поля в бессеточном зазоре резонатора.

Варнеке и Генар [2], анализируя взаимодействие высокочастотного поля бессеточного зазора резонатора с электронным потоком, определили, в частности, коэффициент радиальной скоростной модуляции. Используя последний, можно в принципе рассчитать дальнейшее движение электронного потока при том или ином виде фокусировки.

Вопрос радиального распыления электронного пакета („поперечная разгруппировка“) в клистроне под действием сил объемного заряда рассматривался Гамильтоном и др. [3]. Однако в силу принятых допущений полученные ими результаты не могут считаться удовлетворительным решением задачи.

Целью настоящей статьи является оценка расфокусирующих сил объемного заряда в электронном потоке клистрона* в условиях динамического режима.

* Или какого-либо другого прибора, в котором имеет место процесс скоростной модуляции электронного потока с последующей его группировкой.

§ 2. Постановка задачи

Необходимым условием работы клистрона в динамическом режиме является процесс группирования электронного потока в пространстве дрейфа, благодаря чему происходит перераспределение плотности электронного тока и плотности объемного заряда по длине потока. На рис. 1 представлено распределение плот-

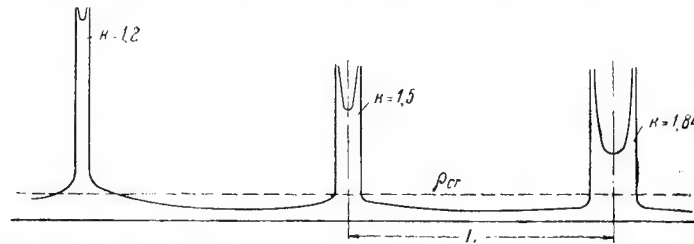


Рис. 1. Распределение плотности объемного заряда по длине пространства дрейфа, при большой степени группирования электронного потока, соответствующей значению параметра группирования $K = \frac{1}{2} \frac{U_m}{U_0} \frac{\omega z}{v_0} > 1$ и глубине модуляции электронного потока $\frac{U_m}{U_0} = 0,1$.

ности объемного заряда $\rho(z)$ по оси сгруппированного потока, рассчитанное в кинематическом приближении [4]. Как видно из этого графика, на определенных участках электронного потока имеет место резкое увеличение плотности объемного заряда*, которое соответствует образованию на этих участках электронных групп (пакетов). Последние имеют резко выраженные границы и, при наличии аксиальной симметрии, приближаются по форме к дискам конечной толщины.

Аналитическое выражение для распределения электронного объемного заряда по длине пространства дрейфа может быть представлено рядом [5]

$$\rho = \rho_{cm} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_n \left(n \frac{1}{2} \frac{U_m}{U_0} \frac{\omega z}{v_0} \right) \sin n \left(\frac{\omega z}{v_0} + \alpha \right) \right], \quad (1)$$

где

ρ_{cm} — плотность объемного заряда при отсутствии группирования (т. е. в статическом режиме);

U_0 — ускоряющее напряжение;

U_m — амплитуда модулирующего напряжения;

ω — круговая частота модулирующего напряжения;

* Бесконечные выбросы на графике распределения плотности объемного заряда являются лишь результатом использования при расчете кинематического приближения и в действительности не имеют места; распределение плотности заряда, сохраняя в общем свой характер, дается, однако, более плавными кривыми. Такие кривые распределения плотности наблюдались Я. Эрдели на ионной модели клистрона [7].

v_0 — скорость электронов при отсутствии группирования;
 α — фазовый угол;
 J_n — функции Бесселя 1-го рода, порядка n .

В результате наличия перераспределения плотности объемного заряда возникают дополнительные (по сравнению со статическим режимом) электрические поля. Эти поля могут привести к расширению электронного потока в радиальном направлении, т. е. к его расфокусировке.

Задача оценки расфокусирующих сил объемного заряда заключается, таким образом, в расчете электрического поля в пространстве дрейфа в присутствии электронного потока с неоднородным распределением объемного заряда. Решение этой задачи будет проводиться при следующих допущениях:

- 1) считается, что можно пренебречь запаздыванием потенциалов и задача решается как квазистатическая. Для большинства практических случаев такое предположение допустимо;
- 2) предполагается, что поток обладает симметрией вращения и имеет неизменное по длине поперечное сечение;
- 3) принимается обычное для такого рода расчетов предположение об однородности распределения плотности объемного заряда по сечению потока.

При сделанных допущениях задача сводится к решению уравнения Пуассона

$$\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -4\pi\rho(z) \quad (2)$$

внутри цилиндрической полости, образующей пространство дрейфа (рис. 2).

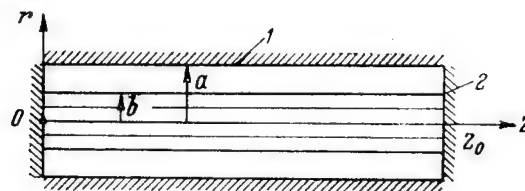


Рис. 2. Электронный поток в пространстве дрейфа:
 1 — цилиндрический экран; 2 — торцовые стенки (выполненные, например, в виде сеток).
 a — радиус экрана; b — радиус потока.

§ 3. Расчет поля в пространстве дрейфа

Для решения уравнения Пуассона воспользуемся методом интегрального преобразования Ханкеля с конечными пределами [6]. Умножая уравнение (2) на

$$rJ_0\left(\lambda_l \frac{r}{a}\right),$$

где

J_0 — функция Бесселя нулевого порядка,
 λ_i — корень этой функции,
 a — радиус цилиндрической поверхности, ограничивающей пространство дрейфа (рис. 2),
и, интегрируя по r от нуля до a , найдем, что преобразованная по Ханкелю потенциальная функция

$$U_J = \int_0^a r U J_0 \left(\lambda_i \frac{r}{a} \right) dr \quad (3)$$

будет удовлетворять дифференциальному уравнению

$$\frac{d^2 U_J}{dz^2} - \left(\frac{\lambda_i}{a} \right)^2 U_J = -\lambda_i J_1(\lambda_i) U(a) - 4\pi \rho_J, \quad (4)$$

где

J_1 — функция Бесселя первого порядка;
 ρ_J — преобразованная функция плотности объемного заряда, даваемая выражением

$$\rho_J = \int_0^a r \rho(z) J_0 \left(\lambda_i \frac{r}{a} \right) dr. \quad (5)$$

Для получения интересующего нас решения уравнения Пуассона достаточно определить значение преобразованной функции из уравнения (4) и подставить его в формулу обращения

$$U = \frac{2}{a^2} \sum_i U_J \frac{J_0 \left(\lambda_i \frac{r}{a} \right)}{[J_1(\lambda_i)]^2}; \quad (6)$$

здесь суммирование ведется по положительным корням функции J_0 .

Влияние условий на границе области, в которой ищется решение, учитывается первым членом в правой части уравнения (4) и соответствующими граничными условиями для преобразованной функции на торцовых поверхностях этой области. В нашем случае рассматриваемая область ограничивается поверхностью металлической коробки, образующей пространство дрейфа. Потенциал этой поверхности можно без ущерба для общности решения принять равным нулю. Тогда уравнение (4) будет иметь вид

$$\frac{d^2 U_J}{dz^2} - \left(\frac{\lambda_i}{a} \right)^2 U_J = -4\pi \rho_J$$

или с учетом (5) и после соответствующих преобразований

$$\frac{d^2 U_J}{dz^2} - \left(\frac{\lambda_i}{a} \right)^2 U_J = -4\pi \rho \frac{ba}{\lambda_i} J_1 \left(\lambda_i \frac{b}{a} \right), \quad (7)$$

где b — радиус электронного потока, а граничные условия для функции U_J будут заключаться в требовании равенства ее нулю

на торцовых поверхностях области и в соответствии с обозначениями рис. 2 запишутся в виде:

$$U_J|_{z=0} = 0; \quad U_J|_{z=z_0} = 0. \quad (8)$$

Подставляя в (7) аналитическое выражение для распределения плотности электронного заряда в пространстве дрейфа (2), получим следующее уравнение для расчета U_J

$$\begin{aligned} \frac{d^2 U_J}{dz^2} - \left(\frac{\lambda_i}{a} \right)^2 U_J = \\ = -4\pi\varphi_{cm} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_n \left(n \frac{1}{2} \frac{U_m}{U_0} \frac{\omega z}{v_0} \right) \sin n \left(\frac{\omega z}{v_0} + \alpha \right) \right], \end{aligned} \quad (9)$$

причем здесь введено обозначение

$$\varphi_i = \frac{ba}{\lambda_i} J_1 \left(\lambda_i \frac{b}{a} \right). \quad (10)$$

Определение U_J из уравнения (9) и подстановка его значения в уравнение (6) и дают в принципе решение поставленной задачи расчета поля в пространстве дрейфа. Однако получение решения этой задачи в конечном виде сопряжено с трудностью интегрирования уравнения (9), так как члены ряда, входящего в правую часть уравнения, имеют сложную зависимость от координаты z , которая выражается произведением тригонометрической функции и функции Бесселя. Для того чтобы довести решение до вида, пригодного для практических расчетов, заменим распределение плотности электронного заряда, даваемое выражением (9), приближенным. Для этого аппроксимируем форму электронного пакета прямоугольной (как показано на рис. 3) и представим

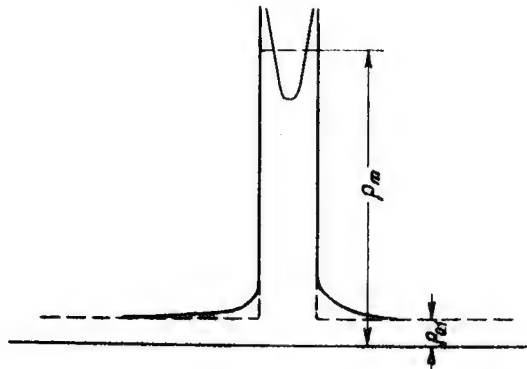


Рис. 3. Аппроксимация формы электронного пакета.

наты z , которая выражается произведением тригонометрической функции и функции Бесселя. Для того чтобы довести решение до вида, пригодного для практических расчетов, заменим распределение плотности электронного заряда, даваемое выражением (9), приближенным. Для этого аппроксимируем форму электронного пакета прямоугольной (как показано на рис. 3) и представим

распределение заряда, как наложение некоторой постоянной слагающей ρ_{01} и переменной слагающей ρ_{\sim} в виде последовательности прямоугольных импульсов (рис. 4). В этом случае аналитическое выражение для распределения объемного заряда ρ_{\sim} может быть представлено обычным рядом Фурье с постоянными коэффициен-

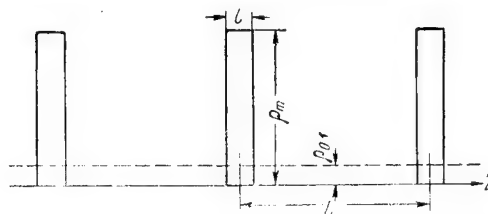


Рис. 4. Приближенное распределение объемного заряда по длине пространства дрейфа.

тами. Интегрирование уравнения (7) с правой частью в виде такого ряда уже не представляет труда. Интеграл будем, как обычно, искать в виде суммы частного решения этого уравнения и общего решения однородного уравнения. Последнее будет иметь вид

$$U_1 = P_1 e^{\gamma z} + P_2 e^{-\gamma z}, \quad (11)$$

где P_1 и P_2 — произвольные постоянные;

$$\gamma = \frac{\lambda_i}{a}.$$

Если задать распределение плотности объемного заряда выражением

$$\rho = \rho_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \rho_n^{(1)} \sin n \frac{2\pi}{L} z + \rho_n^{(2)} \cos n \frac{2\pi}{L} z, \quad (12)$$

то частное решение уравнения (7) найдется в виде

$$U_2 = \frac{4\pi\epsilon_i}{\gamma^2} \rho_0 + 4\pi\epsilon_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho_n^{(1)}}{\gamma^2 + \left(\frac{2\pi}{L} n\right)^2} \sin n \frac{2\pi}{L} z + \frac{\rho_n^{(2)}}{\gamma^2 + \left(\frac{2\pi}{L} n\right)^2} \cos n \frac{2\pi}{L} z. \quad (13)$$

Тогда общее решение уравнения определится выражением

$$U = U_1 + U_2 = P_1 e^{\gamma z} + P_2 e^{-\gamma z} + \frac{4\pi\epsilon_i}{\gamma^2} \rho_0 + 4\pi\epsilon_i S(\gamma, z), \quad (14)$$

где обозначено

$$S(\gamma, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\rho_n^{(1)}}{\gamma^2 + \left(\frac{2\pi}{L} n\right)^2} \sin n \frac{2\pi}{L} z + \frac{\rho_n^{(2)}}{\gamma^2 + \left(\frac{2\pi}{L} n\right)^2} \cos n \frac{2\pi}{L} z. \quad (15)$$

Определим произвольные постоянные P_1 и P_2 с учетом сформулированных выше граничных условий для U_J (8).

Полагая в (14) $z = 0$ и $z = z_0$, найдем

$$P_1 + P_2 = -\frac{4\pi\varphi_i}{\gamma^2} \rho_0 - 4\pi\varphi_i S(\gamma, 0)$$

и

$$P_1 e^{\gamma z_0} + P_2 e^{-\gamma z_0} = -\frac{4\pi\varphi_i}{\gamma^2} \rho_0 - 4\pi\varphi_i S(\gamma, z_0).$$

Отсюда после алгебраических преобразований получим

$$P_1 = \frac{-4\pi\varphi_i \left[\frac{\rho_0}{\gamma^2} + S(\gamma, z_0) \right] + 4\pi\varphi_i \left[\frac{\rho_0^2}{\gamma^2} + S(\gamma, 0) \right] e^{-\gamma z_0}}{e^{\gamma z_0} - e^{-\gamma z_0}}, \quad (16)$$

$$P_2 = -4\pi\varphi_i \left[\frac{\rho_0}{\gamma^2} + S(\gamma, 0) \right] - P_1. \quad (17)$$

Подставляя значения U_J , даваемое формулой (14), в (6), получим следующее выражение для расчета потенциала в пространстве дрейфа

$$U = \frac{2}{a^2} \sum_i \frac{J_0 \left(\lambda_i \frac{r}{a} \right)}{[J_1(\lambda_i)]^2} - \left\{ P_1 e^{\gamma z} + P_2 e^{-\gamma z} + 4\pi\varphi_i \left[\frac{\rho_0}{\gamma^2} + S(\gamma, z) \right] \right\}. \quad (18)$$

Входящие сюда величины φ_i , $S(\gamma, z)$, P_1 и P_2 определяются соответственно формулами (10), (15), (16), (17). Формула (18) дает потенциал объемного заряда как суперпозицию потенциала постоянной слагающей и потенциала его пространственных гармоник. Отметим, что эта формула учитывает влияние на поле объемного заряда в пространстве дрейфа как окружающего поток металлического цилиндрического экрана, так в общем случае и торцовых стенок*.

В тех случаях, когда торцовые стенки удалены от пространства группирования электронного потока (как это имеет место в многорезонаторном бессеточном клистроне) и не оказывают влияния на поле в рассматриваемой области, для расчета могут быть использованы формулы, являющиеся предельными случаями выражения (18):

а. Случай пространства дрейфа ограниченного с одной стороны

Считая z_0 достаточно большими (в пределе полагая z_0 стремящимся к бесконечности), из формул (16), (17), (18) найдем:

$$P_1 = 0; \quad P_2 = -4\pi\varphi_i \left[\frac{\rho_0}{\gamma^2} + S(\gamma, 0) \right]$$

* Например, сеток, закрывающих пространство группирования в сеточном клистроне.

II

$$U = \frac{2}{a^2} \sum_i \frac{J_0\left(\lambda_i \frac{r}{a}\right)}{[J_1(\lambda_i)]^2} \left\{ 4\pi\varphi_i \left[\frac{\rho_0}{\gamma^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + S(\gamma, z) \right] - 4\pi\varphi_i \left[\frac{\rho_0}{\gamma^2} + S(\gamma, 0) \right] e^{-\gamma^2 z} \right\}. \quad (19)$$

Экспоненциальный член в этой формуле учитывает влияние ограничивающей пространство дрейфа торцевой стенки.

б. Случай пространства дрейфа неограниченной протяженности

Выражение для потенциала в этом случае получается, если отбросить в формуле (19) член с экспоненциальным множителем, т. е.

$$U = \frac{2}{a^2} \sum_i \frac{J_0\left(\lambda_i \frac{r}{a}\right)}{[J_1(\lambda_i)]^2} 4\pi\varphi_i \left[\frac{\rho_0}{\gamma^2} + S(\gamma, z) \right]. \quad (20)$$

Для случая, когда электронный поток целиком заполняет экран ($b=a$), эта формула может быть преобразована к виду (см. Приложение)

$$U = \pi\rho_0(a^2 - r^2) + \frac{2}{a^2} \sum_i \frac{J_0\left(\lambda_i \frac{r}{a}\right)}{[J_1(\lambda_i)]^2} 4\pi\varphi_i S(\gamma, z). \quad (21)$$

Входящее сюда выражение для потенциала постоянной слагающей объемного заряда $-\pi\rho_0(a^2 - r^2)$ совпадает с соотношением, которое элементарным путем может быть получено из теоремы Гаусса. Этот факт служит подтверждением правильности полученных выше формул для расчета потенциала.

Выражения (18), (19), (20) дают значение потенциала в любой точке пространства дрейфа. Интересующая нас радиальная слагающая напряженности поля получается дифференцированием этих формул по координате r .

Ниже мы выписываем выражения радиальной составляющей поля для двух рассмотренных частных случаев:

а)

$$E_r = 8\pi b \sum_i \frac{\alpha_i}{\lambda_i^2} \left\{ \left[\rho_0 + \gamma^2 S(\gamma, z) \right] + \left[\rho_0 + \gamma^2 S(\gamma, 0) \right] e^{-\gamma^2 z} \right\}, \quad (22)$$

где

$$\alpha_i = \frac{J_1\left(\lambda_i \frac{b}{a}\right) J_1\left(\lambda_i \frac{r}{a}\right)}{[J_1(\lambda_i)]^2}. \quad (23)$$

6)

$$E_r = 8\pi b \sum_i \frac{\alpha_i}{\lambda_i^2} [\rho_0 + \gamma^2 S(\gamma, z)]. \quad (24)^*$$

§ 4. Оценка расфокусирующих сил объемного заряда в пространстве дрейфа

Дадим сравнительный расчет расфокусирующих сил объемного заряда, действующих на периферийные электроны потока при отсутствии группирования (статический режим) и при наличии группирования (динамический режим). При расчете считаем пространство дрейфа достаточно длинным, чтобы пренебречь влиянием торцовых стенок. В этом случае величина радиальной силы, действующей на крайние электроны потока в статическом режиме, определится выражением

$$F_{rcm} = 2\pi b e \rho_{cm}, \quad (25)$$

где e — величина заряда электрона.

Здесь использовано вытекающее из теоремы Гаусса соотношение

$$E_{rcm} = 2\pi b \rho_{cm}.$$

В условиях динамического режима радиальная сила с учетом (24) представится в виде

$$F_{r \text{ дин}} = 2\pi b e \rho_0 + 8\pi b e \rho_m \sum_i \alpha_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_i^2 + \left(\frac{2\pi}{L} a n\right)^2} \left(\varphi_n^{(1)} \sin n \frac{2\pi}{L} z + \right. \\ \left. + \varphi_n^{(2)} \cos n \frac{2\pi}{L} z \right), \quad (26)$$

где

ρ_0 — постоянная слагающая плотности объемного заряда, представляющая собой сумму постоянной слагающей плотности объемного заряда в пространстве дрейфа ρ_{01} и постоянной составляющей разложения в ряд Фурье $\rho_{02} = \rho_m \varphi_0$;

ρ_m — усредненная величина плотности объемного заряда в пакете (см. рис. 4);

$\varphi_0, \varphi_n^{(1)}, \varphi_n^{(2)}$ — коэффициенты разложения $\rho_{\sim}(z)$ в ряде Фурье.

Выражая ρ_0 и ρ_m через значение плотности объемного заряда в статическом режиме

$$\rho_0 = \zeta_0 \rho_{cm} \quad \text{и} \quad \rho_m = \zeta_m \rho_{cm}, \quad (27)$$

* Поле постоянной слагающей объемного заряда здесь также может быть рассчитано более просто с помощью соотношений, вытекающих из теоремы Гаусса

$$E_r = 2\pi r \rho \quad (r \leq b); \quad E_r = 2\pi b \rho \frac{b}{r} \quad (r \geq b).$$

будем иметь

$$F_{rдин} = 2\pi e b \rho_{cm} k_F, \quad (28)$$

где k_F дается выражением

$$k_F = \zeta_0 + 4\zeta_m \sum_i \alpha_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{i^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 \left(2n \frac{b}{L} - n\right)^2} \left(\varphi_n^{(1)} \sin n \frac{2\pi}{L} z + \right. \\ \left. + \varphi_n^{(2)} \cos n \frac{2\pi}{L} z \right). \quad (29)$$

Сопоставляя формулы (25) и (28), находим

$$F_{rдин} = F_{rcm} k_F. \quad (30)$$

Формулы (29) и (30) позволяют оценить изменение расфокусирующей силы, действующей на крайние электроны потока ($r=b$) в условиях динамического режима по сравнению со статическим режимом. Вычислим, например, радиальную силу, действующую на электроны, образующие центр электронной группы, при степени сгруппированности электронов в потоке, соответствующей параметру группирования, равному 1,84*. В этом случае величина постоянной слагающей объемного заряда в пространстве дрейфа может быть принята равной $\rho_0 = 0,5 \rho_{cm}$, величина усредненной плотности объемного заряда в пакете $\rho_m = 3\rho_{cm}$, отношение протяженности электронного пакета l к пространственному интервалу между пакетами L равным $\frac{l}{L} = \frac{1}{6}$. Тогда расчет по формуле (29) для случая, когда электронный поток целиком заполняет экран ($a=b$), дает значение коэффициента k_F , равное ~ 3 . Причем величина входящего в расчетную формулу отношения была принята равной $\frac{b}{L} = 0,1$, что соответствует, например, практическому случаю клистрона с такими типичными данными $2b = 1,5 \text{ см}$, $U_0 = 15 \text{ кВ}$, $\omega = 2\pi \cdot 10^{11} \text{ гц}$. Таким образом, расчет показывает, что величина расфокусирующих сил объемного заряда в условиях динамического режима, там где имеет место значительное группирование электронов, может существенно превышать их величину при отсутствии группирования потока. В соответствии с этим представляется целесообразным использовать для фокусировки потока в динамическом режиме магнитное поле, нарастающее по длине пространства дрейфа.

§ 5. Заключение

В статье произведен анализ расфокусирующих сил объемного заряда в условиях динамического режима. В результате анализа получены формулы, позволяющие произвести оценочный расчет

* Такое значение параметра группирования является оптимальным при работе клистрона в режиме усиления мощности.

поля объемного заряда в пространстве дрейфа при наличии группирования электронного потока с учетом влияния окружающего потока металлического экрана. Эти формулы дают возможность, в частности, рассчитать радиальную составляющую поля E_r и, таким образом, оценить расфокусирующее действие объемного заряда в сгруппированном электронном потоке. Приведенный пример оценки показывает, что величина расфокусирующей силы при наличии группирования может значительно возрастать по сравнению с ее величиной в статическом режиме.

Отметим, что, хотя приведенный анализ производился применительно к случаю клистронного генератора, его результаты могут быть использованы в той или другой мере и для других приборов СВЧ, в которых имеет место группирование электронного потока.

Приложение

Для случая, когда электронный поток целиком заполняет экран ($b=a$), выражение для потенциала постоянной слагающей объемного заряда U_0 запишется в виде

$$U_0 = 8\pi\rho_0 \frac{1}{a^2} \sum_i \frac{a J_1(\lambda_i) J_0\left(\lambda_i \frac{r}{a}\right)}{\left(\frac{\lambda_i}{a}\right)^3 [J_1(\lambda_i)]^2}. \quad (1)$$

Сравнивая это выражение с формулой обращения (6), замечаем, что трансформантой функции U_0 будет являться выражение

$$4\pi\rho_0 a \frac{J_1(\lambda_i)}{\left(\frac{\lambda_i}{a}\right)^3}.$$

Такой вид трансформанты (преобразованной функции) позволяет определить исходную функцию U_0 , не прибегая к формуле обращения непосредственно по таблице трансформант [6], из которой находим, что исходная функция будет иметь вид

$$U_0 = \pi\rho_0 (a^2 - r^2). \quad (2)$$

Заметим, что, используя (1) и (2), можно попутно получить следующее математическое соотношение

$$\sum_i \frac{1}{\lambda_i^2} = 0,25.$$

Действительно, приравняв правые части этих соотношений, производя дифференцирование по координате r и полагая затем $r=a$, сразу же находим

$$8\pi\rho_0 a \sum_i \frac{1}{\lambda_i^2} = 2\pi\rho_0 a$$

или

$$\sum_i \frac{1}{\lambda_i^2} = 0,25.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. B. B. van Iperen, Trüfröhren für 100 bis 1000 Watt Dauerleistung, Philips tech Rundschau № 7, 1952.
 2. R. Warneke, P. Guenard, Les tubes electroniques a commande par modulation de vitesse, Paris, 1951.
 3. Клистроны, Изд-во „Советское радио“, ч. I, 1952.
 4. К. Шпангенберг, Электронные лампы, ч. II. Изд-во „Советское радио“, 1954.
 5. В. И. Калинин, Генерирование дециметровых и сантиметровых волн, Связьиздат, 1948.
 6. И. Снеддон, Преобразования Фурье. Изд-во иностранной литературы, Москва, 1955.
 7. Я. Эрдели, Диссертация, ЛЭТИ, 1954.
-

*Инженер А. В. КУЗНЕЦОВА,
ассистент С. И. МОЛОКОВСКИЙ*

ФОКУСИРОВКА МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ СИСТЕМЫ СОЛЕНОИДОВ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА С БОЛЬШИМ ЗНАЧЕНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА *

В лаборатории радиотехнической электроники ЛЭТИ проводилась работа по исследованию фокусировки мощного электронного потока большой протяженности. Исследовался представляющий практический интерес случай фокусировки магнитным полем системы соленоидов при неэкранированной от поля электронной пушке. В настоящем сообщении излагаются некоторые экспериментальные результаты этой работы.

Экспериментальное исследование условий фокусировки проводилось на специальном электровакуумном макете, схематический чертеж которого приведен на рис. 1.

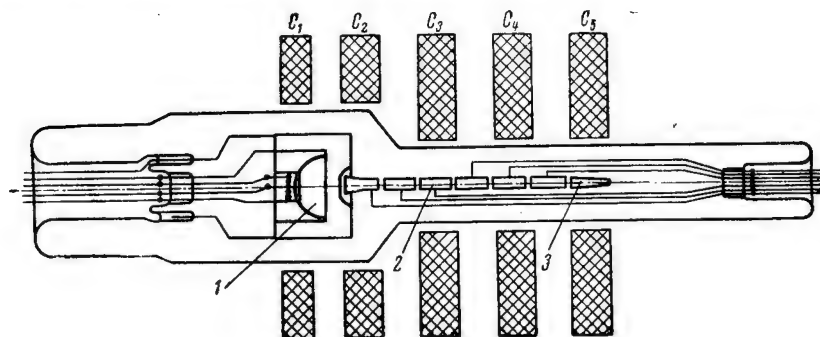


Рис. 1 Схематический чертеж экспериментального макета.

Первоначальное формирование потока осуществлялось электронной пушкой типа Пирса (рис. 1, 1), создающей сходящийся электронный поток (степень сжатия потока по диаметру 3).

В дальнейшем электронный поток, пройдя отверстие в аноде пушки, попадал в эквипотенциальное пространство, образованное

* Некоторые результаты экспериментального исследования.

металлическим секционированным цилиндром (рис. 1, 2), длина которого составляла $l = 24$ см, радиус $R_a = 0,75$ см. Как показал предварительный расчет, а затем подтвердил и эксперимент, электронный поток под действием расталкивающих сил пространственного заряда быстро расходился и практически терялся на первых секциях пролетного цилиндра. Для того, чтобы пропустить электронный поток на коллектор модели (рис. 1, 3), требовалась фокусировка потока магнитным полем. Последняя в нашем случае осуществлялась полем системы соленоидов ($C_1 C_2 C_3 C_4 C_5$ на рис. 1). Токи соленоидов могли регулироваться и вместе, и раздельно в весьма широких пределах. Таким образом, оказывалось возможным менять величину напряженности магнитного поля и распределение его вдоль оси потока. Контролируя ток на анод, секции пролетного цилиндра и коллектор, имевшие для этой цели отдельные выводы, можно было подбирать оптимальное распределение поля, при котором ток на коллектор достигал наибольшего значения.

На рис. 2 приведено полученное экспериментально распределение магнитного поля вдоль оси электронного потока, при котором ток на коллектор I_k составлял 95% от тока с катода I_0 .

Режим работы модели при этом был следующим: ускоряющее напряжение $U_a = 5$ кВ, ток с катода $I_0 = 0,37$ а. Без магнитной фокусировки ток на коллектор в этом же режиме практически отсутствовал.

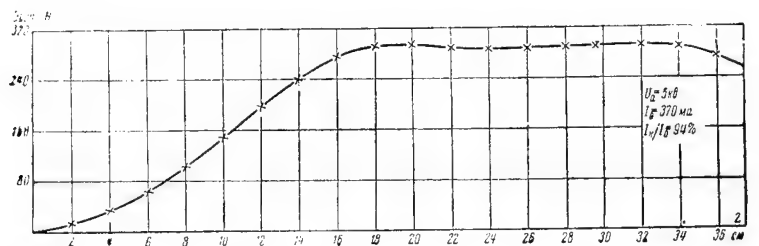


Рис. 2. Распределение магнитного поля вдоль оси электронного потока.

Как видно из графика рис. 2, на значительном участке напряженность магнитного поля H практически постоянна, и, таким образом, поле на этом участке приближается к однородному. В направлении к катоду напряженность поля постепенно убывает, уменьшаясь в плоскости катода до нуля.

Экспериментально было установлено, что сильное влияние на фокусировку потока оказывает поле соленоида C_1 , расположенного приблизительно в плоскости катода электронной пушки.

Существенно отметить, что наилучшее прохождение тока на коллектор имело место при встречном включении соленоида C_1 , т. е. когда его поле направлено навстречу полю остальных.

На графике рис. 3 представлена зависимость тока на коллектор в процентах к току с катода от тока соленоида C_1 при согласном (б) и встречном его включении (а).

Соответствующие различным токам этого соленоида распределения поля представлены на рис. 4. Как следует из этих графиков, при практически неизменной величине магнитного поля на большей части электронного потока ток на коллектор сильно меняется при изменении величины поля в области катода, причем оптимальное токопрохождение в данном случае имеет место при напряженности магнитного поля, равной нулю. Эти результаты согласуются с выводами, полученными на основании анализа магнитных сил в уравнении движения электронов.

Для выяснения влияния на фокусировку потока, ускоряющего напряжение U_a , были сняты зависимости тока на коллектор I_k в функции от напряженности магнитного поля для различных значений анодного напряжения. Экспериментально найдено, что распределение поля, оптимальное для одного какого-либо значения ускоряющего напряжения, сохранится неизменным. Величина же напряженности поля возрастает с ростом ускоряющего напряжения. Этот результат иллюстрируется графиком рис. 5, на котором представлена зависимость тока на коллектор, при различных значениях ускоряющего напряжения: $U_{01}=5$ кВ и $U_{02}=10$ кВ, от величины напряженности поля при неизменной его конфигурации. Как видно из этого графика, с увеличением ускоряющего напряжения процент прохождения тока на коллектор уменьшается (точки а и б на графике).

Увеличивая напряженность магнитного поля, при неизменной его конфигурации, удастся получить прежний процент прохождения тока на коллектор.

Следует отметить, что экспериментальные величины оптимальной напряженности поля $H_{\text{опт}_1}$ и $H_{\text{опт}_2}$ удовлетворяют соотношению

$$H_{\text{опт}_2} = H_{\text{опт}_1} \sqrt{\frac{U_{a_2}}{U_{a_1}}}.$$

Кривая 3 (рис. 5) представляет собой зависимость тока на анод пушки в процентах к общему току от величины магнитного поля для ускоряющего напряжения $U_a=5$ кВ. Ход этой кривой пока-

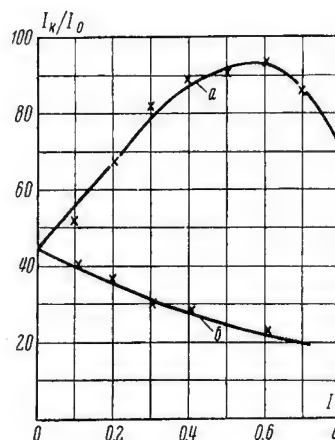


Рис. 3. Зависимость тока на коллектор от тока в первом соленоиде C_1 при согласном и встречном его включении.

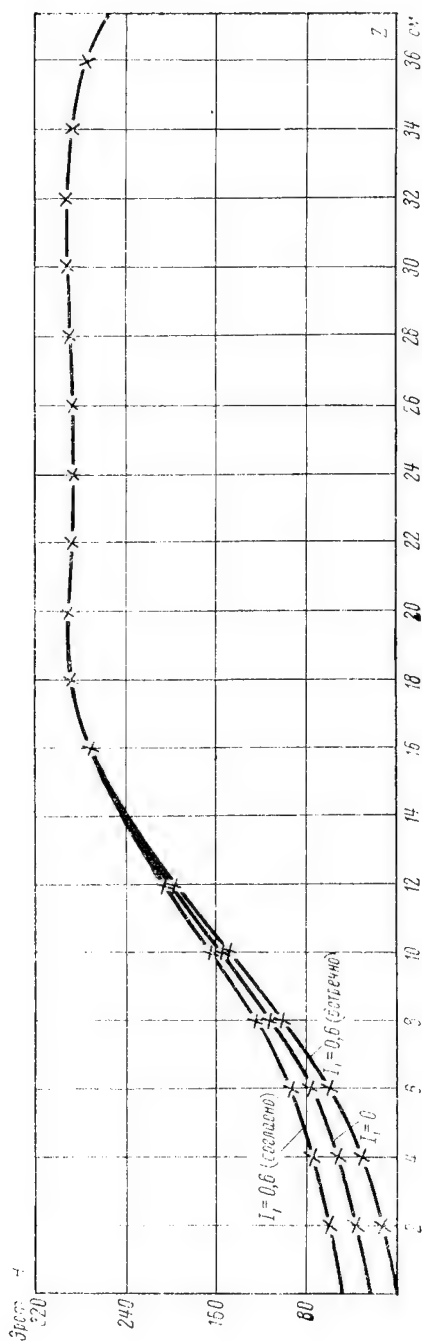


Рис. 4. Распределение магнитного поля вдоль оси потока для различных значений тока соленоида I_1 .

зывает, что эффективность пушки (отношение тока, проходящего через анодное отверстие, к общему току), по мере увеличения фокусирующего магнитного поля возрастает. Этот факт может быть объяснен некоторым дополнительным сжатием электронного потока за счет фокусирующего действия поля в области самой электронной пушки.

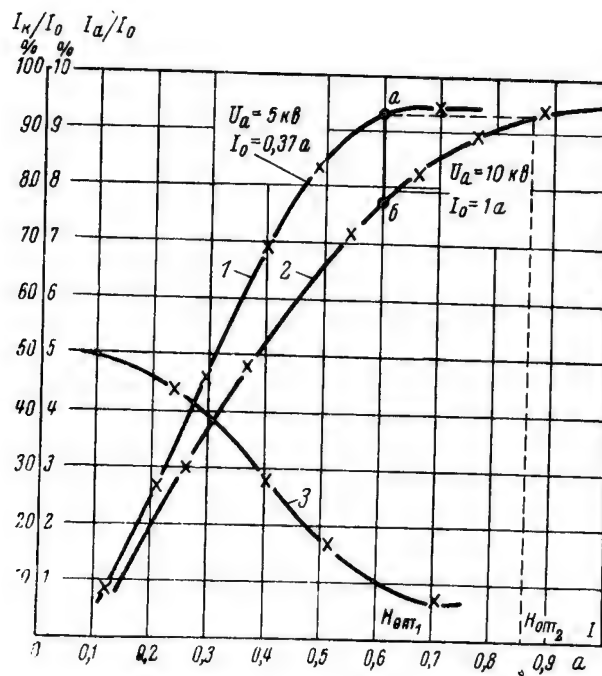


Рис. 5. Зависимость тока на коллектор (в процентах к общему току) от величины магнитного поля. По оси абсцисс отложен ток соленоида C_1 , токи в остальных соленоидах менялись пропорционально этому току. Характер распределения поля по оси потока дается графиком на рис. 2.

В заключение отметим, что испытания проводились в импульсном режиме при длительности импульса 5 мсек и скважности $Q=4000$, что позволило использовать сравнительно большие значения напряжения и тока луча при легком тепловом режиме электродов экспериментальной модели.

Ст. преподав. А. В. ДРАКИН,
инженер В. С. МЕДОВИКОВ

ОБ ЭФФЕКТЕ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ЛУЧА ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ

1. Явление нейтрализации пространственного заряда

Среди условий, влияющих на фокусировку мощных электронных пучков, особо следует выделить условия, способствующие нейтрализации пространственного заряда луча положительными ионами.

Действие расталкивающих сил, обусловленных наличием пространственного заряда, приводит к расходимости параллельных или сходящихся электронных пучков, причем степень расхождения тем больше, чем больше плотность тока, что видно из рис. 1.

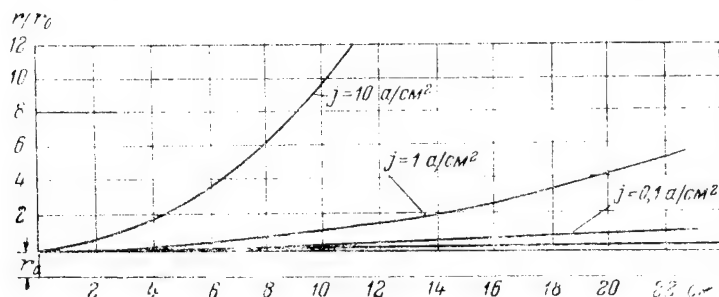


Рис. 1. Расходимость электронного пучка

Однако величина расталкивающих сил может в значительной степени понизиться из-за наличия положительных ионов, образованных соударениями электронов луча и остаточными газовыми молекулами. Следует указать, что даже при хорошем вакууме образующихся положительных ионов теоретически достаточно для полной нейтрализации луча. Последнее имеет место в том случае, когда конфигурация электродов в приборе приводит к образованию ионных ловушек.

На рис. 2 изображено сечение цилиндра А с проходящим внутри электронным потоком В и распределение потенциала в этом сечении.

При отсутствии нейтрализации изменение потенциала происходит приблизительно по параболе внутри луча и по логарифмической кривой между стенкой цилиндра и лучом, как указано в случае (1).

Таким образом, электронный поток, проходящий через полую трубу, будет находиться под воздействием некоторого потенциала ΔU , который должен привести к нарушению нормального токопрохождения. Такой случай имеет место при конструировании мощных лучевых ламп СВЧ, где при условии

$$I_0 < 3,3 \cdot 10^{-6} U_0^{3/2}$$

(здесь I_0 — ток луча, U_0 — напряжение луча) падение потенциала в центре потока составит менее $2,5^\circ$. Превышение I_0 над указанной величиной приведет к изменению токопрохождения.

Как и следовало ожидать, минимум потенциала лежит в центре луча и тянется вдоль всей оси, образуя некоторый потенциальный коридор, окруженный более высоким потенциалом со всех сторон.

Положительные ионы двигаются к центру луча и там задерживаются; таким образом, потенциальный коридор действует как ионная ловушка.

В результате накопления ионов в луче начинается процесс нейтрализации электронного заряда, что приводит к повышению потенциала, как показано на рис. 2 (2). Если в течение этого процесса плотность положительных ионов сравняется с плотностью электронов, то потенциал выравняется, что будет свидетельствовать о полной нейтрализации пространственного заряда и наступления равновесного состояния, как указано на рис. 2 (3).

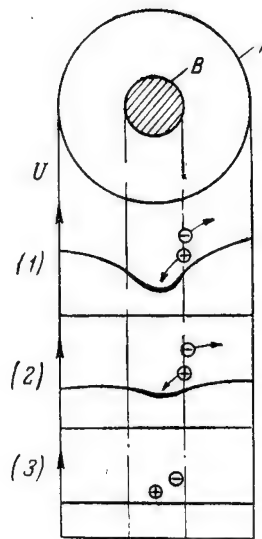


Рис. 2. Распределение потенциала в поперечном сечении трубы с электронным потоком

2. Проектирование модели для наблюдения явления нейтрализации

Описанные в литературе модели, позволяющие наблюдать явление нейтрализации, довольно сложны. Предлагаемая ниже модель позволяет менять фокусировку луча с помощью изменения тока луча (регулировка рабочей температуры танталового катода) без изменения геометрии модели.

Благодаря нейтрализации, уменьшаются силы пространственного расталкивания и улучшается фокусировка. Это выражается в том, что радиус минимального сечения конического потока

уменьшается на некоторую величину. Если в точке минимального сечения потока поставить диафрагму 4 (рис. 3) с отверстием, то очевидно, что ток на диафрагму не будет оставаться таким, каким он был в первый момент после включения.

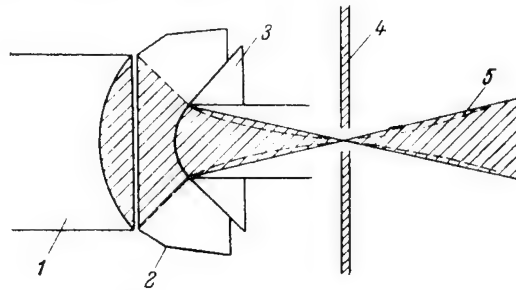


Рис. 3. Принцип устройства модели;

1 — катод; 2 — катодный электрод; 3 — ускоряющий электрод; 4 — диафрагма; 5 — электронный луч

Благодаря нейтрализации, радиус минимального сечения потока уменьшится за время нейтрализации (τ) до некоторой новой величины и, при надлежащем выборе отверстия в диафрагме, весь ток пройдет через него, а ток диафрагмы будет равен нулю. Эти соображения и были положены в основу конструкции модели, схематически изображенной на рис. 3. При этом важно было правильно определить местоположение диафрагмы и отверстия, так как от этого зависело получение характеристики.

$$\frac{I_g}{I} = f(I),$$

где

I_g — ток сквозь отверстие;
 I — общий ток.

Связь этих токов с геометрией диафрагмы выражается так:

$$\frac{I_g}{I} = \frac{r_g^2}{r^2},$$

где

r_g и r — радиусы отверстия диафрагмы и поперечного сечения потока в плоскости диафрагмы, соответственно.

Расчет модели сводится к определению геометрии электронной пушки и определению местоположения диафрагмы и отверстия в ней.

Расчет производится обычным методом, на основании которого были получены следующие данные для пушки с проводимостью (рис. 4):

$$P = \frac{I_{ma}}{U_{hv^{1/2}}} = 2,4; Z_0 = 23,5 \text{ мм}; r_0 = 2,5 \text{ мм}; \Theta = 34^\circ; r_k = 18 \text{ мм}; D_a = 9 \text{ мм}; D_k = 20 \text{ мм}; \gamma = 14^\circ; r_a = 8,2 \text{ мм}.$$

Местоположение и оптимальный размер диафрагмы определяются с тем, чтобы получить изменение отношения $\frac{I_g}{I}$ в пределах $1 \pm 0,1$ при изменении проводимости в 2,5 раза в обе стороны от выбранной.

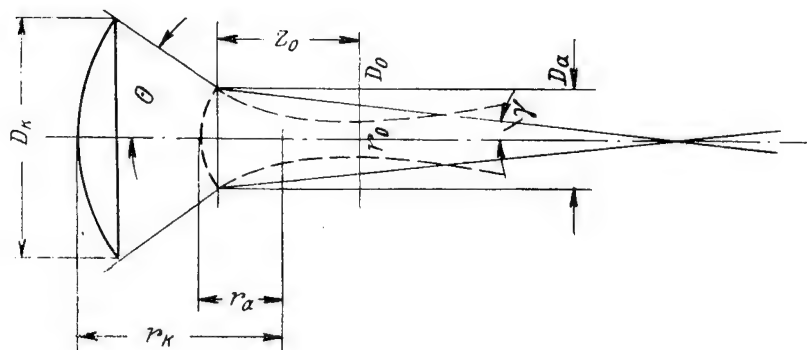


Рис. 4. Электронная пушка модели

На основании графика (рис. 5) была составлена табл. 1,

Таблица 1

P	1	2	3	4
$Z_0, \text{ мм}$	21,2	22,0	24,0	26,0
$D_0, \text{ мм}$	3,6	4,8	5,6	7,2

согласно которой был получен график (рис. 6) для $U = 1000 \text{ в.}$

По данным графика рис. 6 было выбрано местоположение диафрагмы $Z = 23 \text{ мм}$ и радиус отверстия диафрагмы $r_g = 1,5 \text{ мм}$. Из графика рис. 7 видно, что местоположение диафрагмы и величина отверстия в ней выбраны верно (так как колебания отношения $\frac{I_g}{I}$ при изменении P от 1 до 5 лежат в пределах $1 \pm 0,1$).

Для обеспечения равномерного электрического поля в области луча последний пропускался сквозь трубу с $d = 10 \text{ мм}$; $l = 20 \text{ мм}$; (см. рис. 3).

3. Описание конструкции

Внешний вид изготовленной модели показан на рис. 8.

Модель представляет собой стеклянную отпаянную лампу с двумя ножками — катодной и коллекторной.

На катодной ножке укрепляется подогреватель с цилиндром Венельта, катод, катодный электрод, ускоряющий электрод с пролетной трубой и диафрагма.

На коллекторной ножке смонтирован коллектор.

Электроды модели выполнены из тантала, траверсы — из молибдена. Две средние траверсы катодной ножки имеют диаметр 3 мм, а остальные 2 мм. Для изготовления модели применено молибденовое стекло № 46.

Подогреватель изготовлен из вольфрамовой проволоки диаметром 0,3 мм и длиной 14 см; он свернут в виде спирали, но не имеет двух центральных витков, что обеспечивает более равномерный разогрев катода.

Подогреватель крепится точечной сваркой к центральному траверсам. К одной из них крепится цилиндр Венельта, изготовленный из листового тантала толщиной 0,1 мм, диаметром 14 мм и высотой 20 мм. Катод изготовлен методом штамповки из листового тантала толщиной 0,3 мм.

Диаметр катода 20 мм. Радиус кривизны катода 18 мм. Катодный электрод выполнен из тантала толщиной 0,2 мм.

Ускоряющий электрод представляет собой конус с отверстием в вершине, в которое вварена пролетная труба.

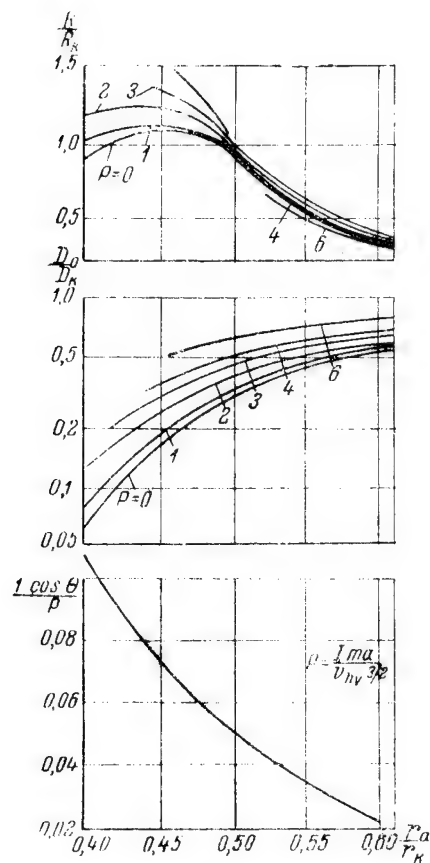


рис. 5. Графики для расчета электронных пучков с заданной проводимостью.

Отверстие в конусе закрыто молибденовой сеткой, которая создаст более равномерный потенциал в отверстии ускоряющего электрода и препятствует попаданию положительных ионов из пролетной трубы на катод.

Отрицательное влияние сетки состоит в том, что она до некоторой степени расфокусирует поток. Шаг сетки 1,2 мм. Пролетная труба изготовлена из никеля, а ускоряющий конус — из тантала 0,2 мм.

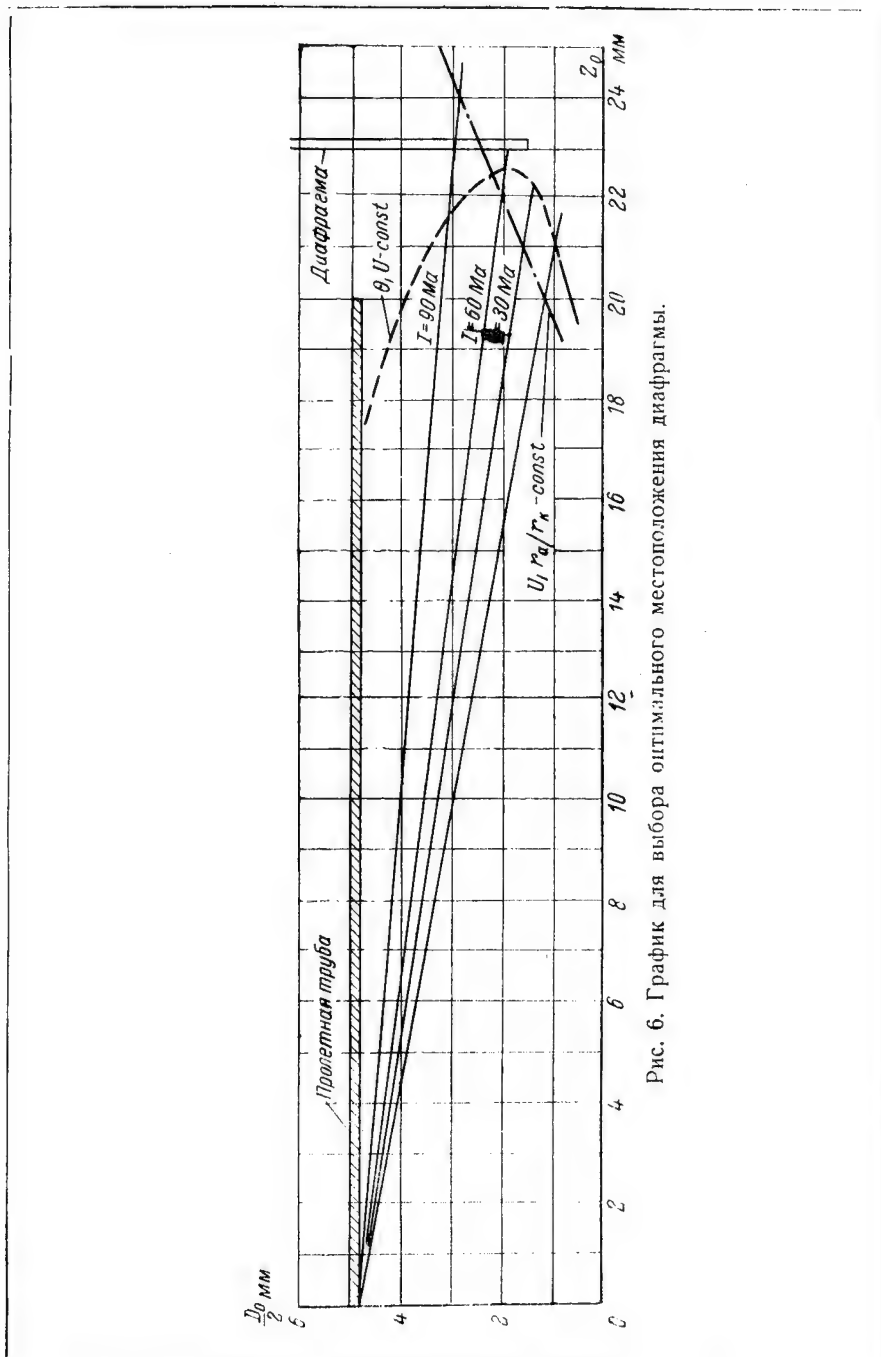


Рис. 6. График для выбора оптимального местоположения диафрагмы.

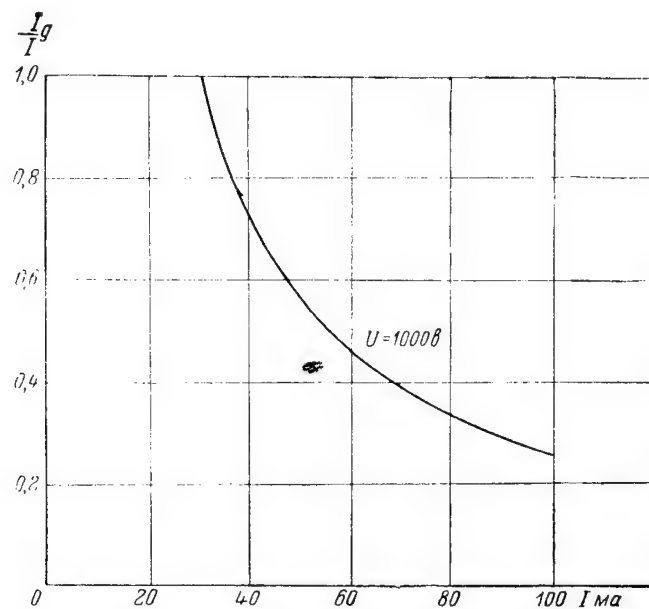


Рис. 7. Токопрохождение при отсутствии нейтрализации

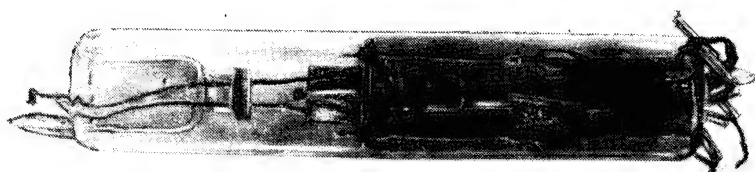


Рис. 8. Внешний вид модели

Диафрагма представляет собой диск с центральным отверстием диаметром 3 мм и изготавливается из тантала толщиной 0,5 мм, чтобы обеспечить рассеивание большой мощности.

Коллектор выполнен из тантала толщиной 0,2 мм и представляет собой конус с дном и ребрами, которые служат для увеличения рассеиваемой мощности. Отдельные детали модели, предварительно обезгаженные в вакууме, поступают на сборку.

Монтаж катодной ножки начинается с приварки к вводам накала подогревателя, центровки и формовки его. Затем крепятся остальные детали. При монтаже особое значение имеет центровка всех деталей, а также правильная выдержка расстояний катод — ускоряющий электрод — диафрагма.

Для центровки диафрагмы относительно пролетной трубы на траверсы диафрагмы надевается центрирующая слюдяная шайба диаметром, равным внутреннему диаметру колбы модели.

Заварка производится на горизонтально-заварочном станке, после чего производится отжиг для снятия натяжения в стекле. Затем модель откачивается обычным способом.

4. Результаты испытаний и выводы

Испытание модели были проведены по схеме приведенной на рис. 9.

Предполагалось, что благодаря эффекту нейтрализации токи на диафрагму и коллектор за время импульса не должны оставаться постоянными; характер их изменения приведен на рис. 10.

В момент времени t_1 , при подаче импульсного напряжения на катод, когда нейтрализация практически отсут-

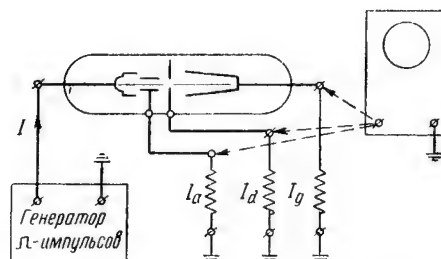


Рис. 9. Схема испытания модели

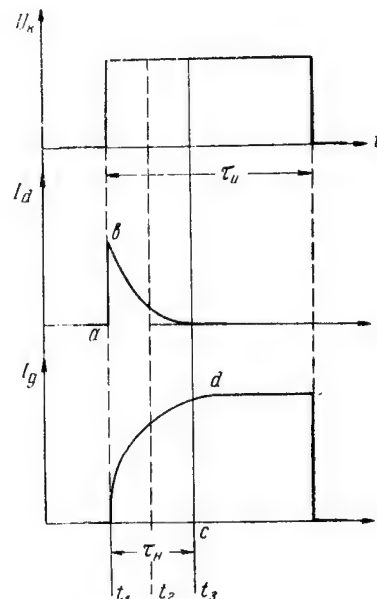


Рис. 10. Форма импульсных токов

ствует, ток в цепи диафрагмы имеет некоторую величину av . В следующий момент времени t_2 , когда образовавшиеся положительные

ионы начинают компенсировать пространственный заряд, силы взаимного расталкивания уменьшаются, луч в плоскости диафрагмы сжимается и ток диафрагмы уменьшается.

В силу этих же причин ток коллектора растет. К моменту времени t_3 наступает равновесие между числом рекомбинированных и вновь образующихся ионов и ток на диафрагме или остается постоянным, или вовсе прекращается, если он весь проходит через отверстие.

Таким образом, ток, соответствующий моменту времени t_1 , имеет место при отсутствии нейтрализации, а ток в момент времени t_3 определяется эффектом нейтрализации.

Если при заданном импульсном напряжении U менять ток луча, то можно снять кривые вида

$$\frac{I_d}{I} = f(I)$$

или

$$\frac{I_g}{I} = f(I) \text{ при } U = \text{const},$$

характеризующие эффект нейтрализации пространственного заряда луча положительными ионами.

Результаты проведенных испытаний представлены на рис. 11, где кривая 1 отражает эффект нейтрализации, а кривая 2 характеризует его отсутствие.

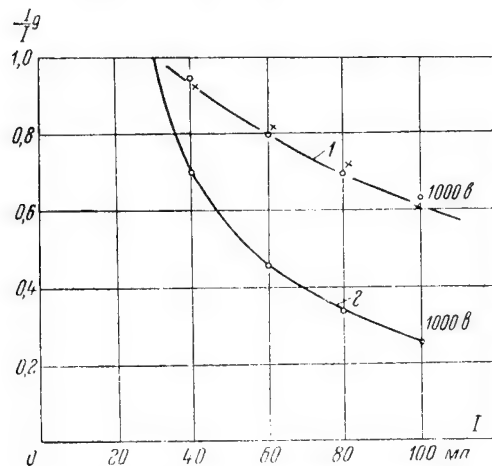


Рис. 11. Кривые токопрохождения.

Таким образом, использованный метод позволяет наблюдать эффект нейтрализации на более простых моделях по сравнению с описанными в литературе, что может иметь значение при изучении и практической разработке электронно-оптических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. G. Linder and K. G. Herngvist, J. Appl. Phys., т. 11, 1088, 1950.
2. Muller, IRE, № 2, 1956.
3. Электронные лампы, II ч., под редакцией С. А. ОБОЛЕНСКОГО, изд-во „Советское радио“, 1954.

*Доктор техн. наук проф. К. И. КРЫЛОВ,
канд. техн. наук доц. В. Н. РУДАКОВ*

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕЩЕСТВ ПРИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

§ 1. Введение

В последние годы, в связи с широким использованием в радиотехнике электромагнитных волн сверхвысоких частот, появилась необходимость в экспериментальном исследовании электромагнитных свойств веществ в сантиметровом, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Для решения этой задачи наряду с волноводными и резонаторными методами все чаще стали применяться оптические методы, отличающиеся значительной простотой.

Первые простейшие оптические приборы для дециметровых электромагнитных волн были построены еще Г. Герцем в конце 80-х годов прошлого века. Общее восхищение среди физиков как в России, так и за границей вызвали в свое время опыты П. Н. Лебедева [1], получившего в 1896 году электромагнитные волны длиной несколько миллиметров и изготовившего для них зеркала, линзы, трехгранные призмы, призмы двойного лучепреломления и т. д.

Шефер и Гросс, а также индийский физик Бозе с помощью асфальтовых призм исследовали явление полного внутреннего отражения для электромагнитных волн длиной 15 см [2]. Хорошие результаты для определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в сантиметровом диапазоне получаются при использовании явления полной поляризации электромагнитных волн при падении их на поверхность вещества под углом Брюстера, а также с помощью интерферометров Фабри-Перо, Больцмана и др. [3], [4], [5], [6].

Ниже описано применение интерферометра Майкельсона для измерения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь при сверхвысоких радиочастотах.

§ 2. Описание экспериментальной установки

Интерферометр для изучения электрических параметров веществ на сверхвысоких частотах состоит из генератора ультра-

коротковолнового излучения (Γ), приемника электромагнитных волн (Π) и системы зеркал (\mathcal{Z}_1 , \mathcal{Z}_2 и \mathcal{Z}), при помощи которых осуществляется интерференция (рис. 1).

Генерация электромагнитного излучения осуществляется при помощи отражательного клистрона. Клистронный генератор

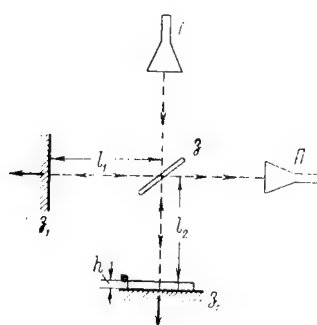


Рис. 1. Принципиальная схема интерферометра Майкельсона.

имеет мощность 15 мвт при длине волны 3,2 см. В качестве источника питания на 300 и 140—170 в употребляется выпрямитель с электронной стабилизацией, который работает от сети переменного тока 50 гц, 220 в. Коаксиальный выход лампы соединяется со стандартным волноводом прямоугольного поперечного сечения. В прямоугольном волновод возбуждается волна типа TE_2 . Волна распространяется вдоль волновода и излучается через рупор. Колебания, излучаемые клистроном, модулируются по амплитуде. Модулирование осуществляется при помощи подачи на отражатель клистрона импульсов прямоугольной формы; для этого употребляется симметричный мультивибратор.

Приемное устройство состоит из рупорной антенны с волноводом (рис. 2). В волновод вмонтирован кристаллический детектор. Продетектированный сигнал при помощи коаксиального кабеля подается на обычный усилитель низкой частоты. Усиленный сигнал поступает на ламповый вольтметр, с помощью которого определяется интенсивность. Все блоки приемного устройства смонтированы на одном шасси, к которому прикрепляется передняя панель. На панели находятся: миллиамперметр, с помощью которого производится измерение интенсивности сигнала, ручка потенциометра, служащего для установки миллиамперметра на нуль, и ручка потенциометра регулировки коэффициента усиления усилителя. На переднюю панель также выведен тумблер включения сети и две клеммы, к которым подводится сигнал.

Генератор микроволнового излучения вместе с волноводом и рупорной антенной смонтирован на массивной деревянной крестовине, заменяющей собой оптическую скамью прибора. Монтаж осуществлен таким образом, что источник излучения может, по желанию, перемещаться на небольшое расстояние параллельно оси оптической скамьи.

Приемник укреплен на деревянной подставке, которая может свободно перемещаться по кругу как окулярная труба оптического гониометра; таким образом, ось приемника может быть расположена под любым углом к направлению распределения си-

гнала. В центре прибора находится вращающийся столик, на который помещается полупрозрачный элемент.

В качестве полупрозрачного элемента употребляется деревянная рамка с рядом натянутых в ней параллельных проводов. При расстоянии между проводами, равном 3 мм, такая система полностью задерживает и отражает электромагнитные волны, когда провода параллельны направлению электрического вектора в волне, но пропускают излучение, если провода расположены под прямым углом к \vec{E} . При расстоянии между проводами 12 мм и расположении рамки под углом 45° к направлению распространения волны оказывается, что половина энергии отражается, а половина проходит сквозь решетку, т. е. решетка является для волн в 3,2 см полупрозрачной пластиной.

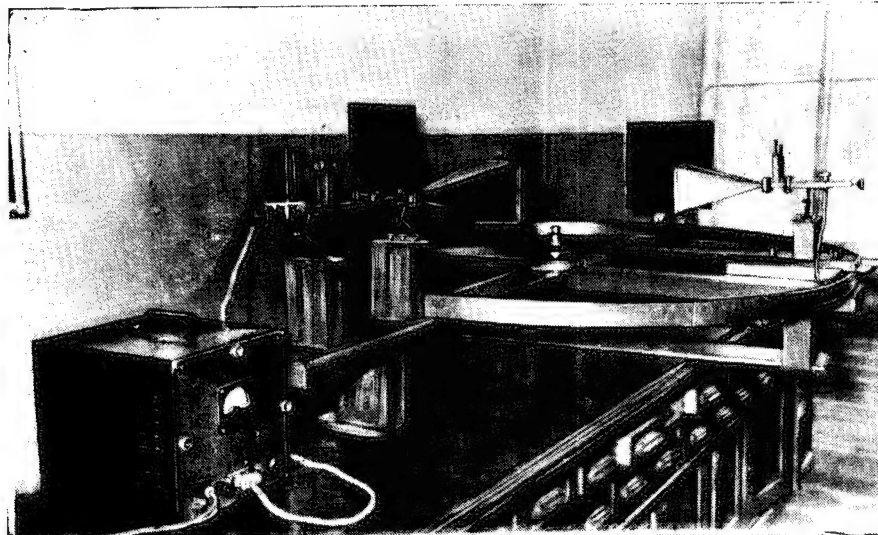


Рис. 2. Общий вид интерферометра Майкельсона для измерений в сантиметровом диапазоне длин волн.

Весь приемник может быть приближен или удален от столика. Зеркала интерферометра, выполненные из массивных металлических листов, помещаются на двух концах крестовины. Перемещение их осуществляется при помощи микрометрических винтов. При желании зеркала могут быть сняты с крестовины (для этого необходимо отвернуть барашки, удерживающие зеркала на металлических подставках).

Налаживание работы интерферометра производится при помощи эбонитовых и стеклянных пластин.

Эбонитовая и стеклянная пластины, употребляемые для внесения разности хода лучей в интерферометре, имеют прямоуголь-

ную форму и размеры их значительно превосходят размеры длины волны (30×30 см). При производстве опыта они помещаются между зеркалом интерферометра $З_2$ и полупрозрачной пластиной $З$ на подставке, имеющейся на деревянной крестовине

§ 3. Интерференция зеркально отраженной волны с волной, отраженной от плоского слоя

Прикроем одно из зеркал интерферометра Майкельсона ($З_2$ на рис. 1) плоским слоем некоторого вещества и определим напряженность электрического поля электромагнитной волны, получающейся в результате интерференции волн, отраженных от зеркала $З_1$ и зеркало $З_2$ с плоским слоем, при встрече их в том месте, где расположено полупрозрачное зеркало $З$.

Если рассматривать плоские, плоско поляризованные электромагнитные волны, то нетрудно показать, что эта напряженность равна

$$E = E_{01} e^{j(\omega t + 2l_1 \frac{\omega}{c} + \varphi_1)} + \sqrt{r} E_{02} e^{j\{\omega t + 2 \frac{\omega}{c} (l_2 - h) + \varphi_2\}}, \quad (1)$$

E_{01} и E_{02} — амплитуды напряженностей электрического поля волн, падающих на зеркала $З_1$ и $З_2$;

h — толщина плоского слоя;

l_1 и l_2 — длины соответствующих плеч интерферометра;

r — коэффициент отражения электромагнитных волн от плоского слоя, прикрывающего зеркало $З_2$ (коэффициент отражения от зеркала $З_1$ примем равным единице);

ω — круговая частота волны;

φ_1 и φ_2 — изменения фазы вектора напряженности электрического поля при нормальном отражении от зеркала $З_1$ (для идеального зеркала $\varphi_1 = \pi$) и плоского слоя.

Найдем r и φ_2 , зная диэлектрическую проницаемость вещества, из которого изготовлен плоский слой (ϵ), угол диэлектрических потерь (δ), считая, что магнитная проницаемость $\mu = 1$ и что электромагнитная волна падает нормально на поверхность плоского слоя. Для этого выберем направления векторов напряженностей электрических и магнитных полей падающих и отраженных волн в точках падения на границы слоя, как показано на рис. 3. На том же рисунке (в скобках) обозначены амплитуды напряженностей электрического поля соответствующих волн. Положим также, что направление оси z совпадает с направлением распространения падающей волны и на поверхности слоя $z = 0$.

Из условий непрерывности E и H на границах раздела воздух-плоский слой ($z = 0$) и плоский слой-зеркало ($z = h$), используя известное соотношение

$$\sqrt{\epsilon^*} E = H,$$

получим уравнения, связывающие между собой амплитуды напряженностей электрического поля

$$\left. \begin{aligned} A_0 + B_1 &= A_2 + B_2 \\ A_0 - B_1 &= n^* (A_2 - B_2) \\ A_2 e^{-jk^*h} + B_2 e^{jk^*h} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

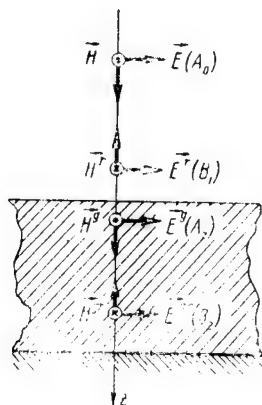


Рис. 3. К выводу формулы для коэффициента отражения электромагнитных волн от плоского слоя.

здесь

$n^* = n - jk = \sqrt{\varepsilon(1 - j\operatorname{tg} \delta)}$ — комплексный показатель преломления вещества плоского слоя;

$k^* = \frac{\omega}{c} n^*$ — его комплексное волновое число (вещество зеркала будем считать идеальным проводником).

Известно, что

$n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{2} \{ \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} + 1 \}}$ — вещественный показатель преломления;

$k = \sqrt{\frac{\varepsilon}{2} \{ \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1 \}}$ — коэффициент затухания электромагнитных волн.

Решая совместно систему уравнений (2), найдем амплитуду волны, отраженной от плоского слоя,

$$B_1 = -A_0 \frac{(n^* + 1) e^{-j2k^*h} + (n^* - 1)}{(j^* - 1) e^{-j2k^*h} + (n^* + 1)}. \quad (3)$$

Обозначим

$$\frac{n^* - 1}{n^* + 1} = R e^{j\psi}, \quad (4)$$

где, как можно показать,

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}; \quad \operatorname{tg} \psi = \frac{2k}{n^2 + k^2 - 1}. \quad (5)$$

Учтя (4) и подставив в (3) выражение для k^* , получим

$$B_1 = A_0 \frac{R e^{j\psi} + e^{-2 \frac{\omega}{c} kh} e^{-j 2 \frac{\omega}{c} nh}}{1 + R e^{-2 \frac{\omega}{c} kh} e^{-j (2 \frac{\omega}{c} nh - \psi)}} = A_0 R e^{j\varphi_2}. \quad (6)$$

Откуда и определим неизвестные нам величины r и φ_2 :

$$r = \frac{|B_1|^2}{A_0^2} = \frac{R + 2 R e^{-2 \frac{\omega}{c} kh} \cos \left(2 \frac{\omega}{c} nh + \psi \right) + e^{-4 \frac{\omega}{c} kh}}{1 + 2 R e^{-2 \frac{\omega}{c} kh} \cos \left(2 \frac{\omega}{c} nh - \psi \right) + R e^{-4 \frac{\omega}{c} kh}}, \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{R (1 + e^{-4 \frac{\omega}{c} kh}) \sin \psi + (1 - R) e^{-2 \frac{\omega}{c} kh} \sin 2 \frac{\omega}{c} nh}{R (1 - e^{-4 \frac{\omega}{c} kh}) \cos \psi + (1 + R) e^{-2 \frac{\omega}{c} kh} \cos 2 \frac{\omega}{c} nh}. \quad (8)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи.

1. Пусть вещество плоского слоя является абсолютно прозрачным, то есть $\operatorname{tg} \delta = 0$, $n^* = n = 1$, ε , $k = 0$. В этом случае

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \psi = 0, \quad (9)$$

поэтому

$$r = 1$$

$$\operatorname{tg} (\varphi_2 - \pi) = \frac{1-R}{1+R} \operatorname{tg} 2 \frac{\omega}{c} nh = \frac{2n}{n^2+1} \operatorname{tg} 2 \frac{\omega}{c} nh. \quad (10)$$

Полученное нами выражение для φ_2 отличается от общепринятого

$$\varphi_2 = 2\pi \frac{2nh}{\lambda} + \pi = 2 \frac{\omega}{c} nh + \pi \quad (11)$$

или

$$\operatorname{tg} (\varphi_2 - \pi) = \operatorname{tg} 2 \frac{\omega}{c} nh$$

и является более точным. Действительно, в формуле (11) предполагается, что изменение фазы определяется удвоенной оптической толщиной слоя $2nh$ и π . На самом же деле необходимо также учитывать изменение фазы, связанное с отражением как от поверхности плоского слоя, так и от зеркала z_2 , а точнее говоря, — с интерференционными явлениями в самом плоском слое.

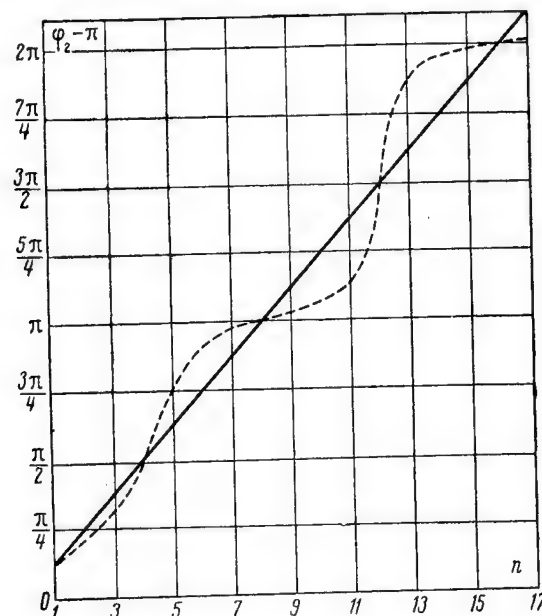


Рис. 4. Графики зависимости смещения фазы электромагнитных волн, вносимого плоским слоем; сплошная линия — без учета интерференционных явлений, пунктирная — с учетом интерференционных явлений в плоском слое.

На рис. 4 приведены графики $\varphi_2 - \pi = f(n)$ при $h = 0,1$ см для электромагнитных волн длиной $\lambda = 3,2$ (или $\frac{h}{\lambda} = 0,0313$). Сплошная кривая построена на формуле (10), пунктирная линия — по формуле (11). Легко видеть, что значения φ_2 , даваемые как той, так и другой формулой, совпадают при $2nh = \frac{\lambda}{4} m$, где $m = 1, 2, 3$ и т. д.

2. Если тангенс угла диэлектрических потерь вещества плоского слоя не равен нулю, но значительно меньше единицы ($0 < \operatorname{tg} \delta \ll 1$), то $n^* \approx n \approx \sqrt{\epsilon}$, а $k \approx \frac{\sqrt{\epsilon}}{2} \operatorname{tg} \delta \ll 1$, поэтому

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \psi \approx \psi \approx \frac{2k}{n^2 - 1}.$$

Пользуясь методом приближенных вычислений, найдем, что при этих условиях

$$r = 1 - 4 \frac{\omega}{c} k n h = 1 - \Delta r;$$

$$\operatorname{tg}(\varphi_2 - \pi) = 2 \frac{k + n \sin 2 \frac{\omega}{c} n h}{2 \frac{\omega}{c} k h (n^2 - 1) + (n^2 + 1) \cos 2 \frac{\omega}{c} n h}. \quad (12)$$

Перейдем теперь в формуле (1) от комплексной к вещественной форме записи

$$E = E_{01} \cos\left(\omega t + 2 \frac{\omega}{c} l_1 + \varphi_1\right) + \\ + \sqrt{r} E_{02} \cos\left(\omega t + 2 \frac{\omega}{c} l_2 - 2 \frac{\omega}{c} h + \varphi_2\right) = E_0 \cos(\omega t + \varphi). \quad (13)$$

В дальнейшем нас будет интересовать лишь амплитуда волны, (E_0) возникающей в результате интерференции зеркально отраженной волны и волны, отраженной от плоского слоя. Как следует из (13),

$$E_0 = \sqrt{E_{01}^2 + r E_{02}^2 + 2 \sqrt{r} E_{01} E_{02} \cos\left\{2 \frac{\omega}{c} (l_2 - l_1 - h) + (\varphi_2 - \varphi_1)\right\}}. \quad (14)$$

Так как обычно

$$E_{01} = E_{02} = A_0,$$

то

$$E_0 = A_0 \sqrt{1 + r + 2 \sqrt{r} \cos\left\{2 \frac{\omega}{c} (l_2 - l_1 - h) + (\varphi_2 - \varphi_1)\right\}}. \quad (15)$$

Вернемся к рассмотренным выше частным случаям.

1. Для абсолютно прозрачных плоских слоев

$$E_0 = A_0 \sqrt{2 \left[1 + \cos\left\{2 \frac{\omega}{c} l_2 - l_1 - h) + (\varphi_2 - \varphi_1)\right\}\right]}. \quad (16)$$

2. Для плоских слоев, изготовленных из вещества с малыми потерями

$$E_0 = A_0 \sqrt{2 \left(1 - \frac{\Delta r}{2}\right) \left[1 + \cos\left\{\frac{\omega}{c} (l_2 - l_1 - h) + (\varphi_2 - \varphi_1)\right\}\right]}. \quad (17)$$

Наконец, при $k = 0$ и $n = 1$

$$E_0 = A_0 \sqrt{2 \left[1 + \cos \frac{\omega}{c} (l_2 - l_1)\right]}, \quad (18)$$

где учтено, что в этом случае

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \frac{\omega}{c} h = \pi + \frac{\omega}{c} h.$$

§ 4. Измерение показателя преломления и тангенса угла потерь вещества с малыми потерями при помощи интерферометра Майкельсона

Приведенное выше решение задачи об интерференции зеркально отраженной волны с волной, отраженной от плоского слоя, позволяет применить интерферометр Майкельсона для измерения показателя преломления и тангенса угла потерь веществ, из которых можно приготовить плоский слой. Эти измерения наиболее просты в том случае, когда потери электромагнитного поля в плоском слое малы.

1. Определение показателя преломления прозрачных веществ ($\operatorname{tg} \delta = 0$)

Режим работы детектора в приемном рупоре интерферометра подберем таким, чтобы показания индикатора (гальванометра) были пропорциональны плотности энергии, переносимой электромагнитной волной, получающейся в результате интерференции, или квадрату ее амплитуды E_0^2 .

Не прикрывая зеркала z_2 плоским слоем, изменяем плечо l_2 интерферометра и строим график зависимости E_0^2 от $(l_2 - l_1)$ (см. кривую 1 на рис. 5). Из формулы (18) находим, что в этом случае

$$E_0^2 = 2A_0^2 \left[1 + \cos \frac{\omega}{c} (l_2 - l_1) \right]. \quad (19)$$

Затем повторяем тот же опыт с плоским слоем, прикрывающим зеркало z_2 (см. кривую 2 на рис. 5). При этом, как следует из (16),

$$E_0^2 = 2A_0^2 \left\{ 1 + \cos \left[2 \frac{\omega}{c} (l_2 - l_1 - h) + (\varphi_2 - \varphi_1) \right] \right\}. \quad (20)$$

Мы видим, что максимумы второй кривой смещены относительно первой на некоторую величину Δ_1 . На основании равенств (19) и (20) можно показать, что

$$\Delta_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\varphi_2 - \varphi_1 - 2 \frac{\omega}{c} h \right). \quad (21)$$

Так как

$$\varphi_2 = \arctg \left(\frac{2n}{n^2 + 1} \operatorname{tg} 2 \frac{\omega}{c} nh \right) + \pi; \quad \varphi_1 = \pi; \quad \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad [\text{см. (10)}],$$

то окончательно получим

$$\Delta_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \arctg \left(\frac{2n}{n^2 + 1} \operatorname{tg} 2 \frac{\omega}{c} nh \right) - 2h. \quad (22)$$

Если $\frac{2n}{n^2 + 1}$ лишь незначительно отличается от единицы, то

$$\Delta_1 = 2h(n - 1). \quad (23)$$

С помощью описанного выше опыта определяем Δ_1 и, решая уравнения (22) или (23) (при $n \approx 1$), находим показатель преломления n и диэлектрическую проницаемость вещества $\varepsilon = n^2$.

2. Определение показателя преломления и тангенса угла диэлектрических потерь для веществ с малыми потерями

При опыте с плоским слоем, приготовленным из вещества, для которого $0 < \operatorname{tg} \delta \ll 1$, получим график $(E_0')^2 = f(l_2)$ (см. кривую 3 на рис. 5). Третья кривая не только смещена относи-

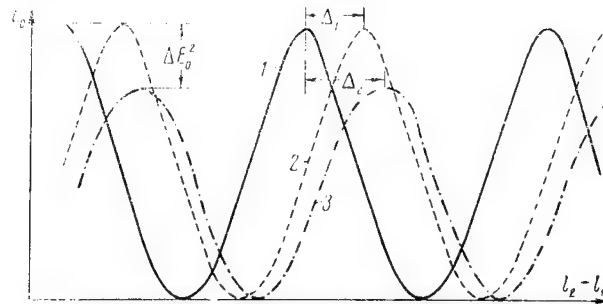


Рис. 5. Зависимость квадрата амплитуды электромагнитной волны от разности плеч интерферометра:
1 — зеркало не прикрыто плоским слоем; 2 — зеркало, прикрыто плоским слоем, изготовленным из прозрачной среды; 3 — то же для среды с потерями.

тельно первой на величину Δ_2 , но и максимумы ее меньше на величину ΔE_0^2 . Как следует из формулы (17), в этом случае

$$(E_0')^2 = 2A_0^2 \left(1 - \frac{\Delta r}{2} \right) \left[1 + \cos \left\{ 2 \frac{\omega}{c} (l_2 - l_1 - h) + (\varphi_2 - \varphi_1) \right\} \right]. \quad (24)$$

Сравнив (24) с (19), найдем, что

$$\Delta E_0^2 = E_{0 \max}^2 - (E_0')_{\max}^2 = \Delta r A_0^2 \quad (25)$$

или

$$\Delta r = 4 \frac{\omega}{c} k n h = \frac{8\pi}{\lambda} k n h = \frac{\Delta E_0^2}{A_0^2} = \frac{\Delta E_0^2}{E_{0 \max}^2}, \quad (26)$$

где $E_{0 \max}^2$ — максимальное значение E_0^2 у кривой 1 (рис. 5).

$$\Delta_2 = \frac{\lambda}{2\pi} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left\{ 2 \frac{k + n \sin \frac{4\pi}{\lambda} n h}{\frac{4\pi}{\lambda} k h (n^2 - 1) + (n^2 + 1) \cos \frac{4\pi}{\lambda} n h} \right\}. \quad (27)$$

Определив Δr и Δ_2 по графикам, изображенным на рис. 5, и решив совместно уравнения (26) и (27), найдем показатель преломления n и коэффициент затухания k , а затем диэлектрическую проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$.

По изложенной здесь методике были определены электрические параметры (ϵ и $\operatorname{tg} \delta$) ряда веществ для электромагнитных волн, длина которых $\lambda = 3,2 \text{ см}$ (частота $\omega = 9,37 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$). Так, для одного из сортов стекла — пирекс по данным наших измерений $n = 4,67$, $\operatorname{tg} \delta = 0,015$. Ниже приводится таблица, характеризующая дисперсные свойства пирекса.

Таблица

Частота изменения напряженностей электромагнитного поля, гц	ϵ	$\operatorname{tg} \delta$
1×10^2	5,6*	—
6×10^4	5,46	0,0019
$1,9 \times 10^6$	5,22	—
$1,2 \times 10^7$	5,02	0,0074
1×10^8	4,09*	0,01*
$9,37 \times 10^9$	4,67	0,015

Звездочкой обозначены числа, заимствованные из таблиц, приведенных в книге А. В. Нетушила и К. М. Поливанова*, данные для ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ при низких частотах ($6 \cdot 10^4 \text{ гц}$, $1,9 \cdot 10^6 \text{ гц}$, $1,2 \cdot 10^7 \text{ гц}$) получены авторами с помощью куметра.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Лебедев П. И., „Журнал Русского физико-химического общества“
2. Шефер, „Теоретическая физика“, том III, часть 2 „Оптика“.
3. W. Culshaw, Proc. Phys. Soc., 1953, July 1 vol 66 Sec B part 7, № 403 B, p. 597—608.
4. J. L. Farrands, J. Brawn, Wireless Engineer, 1954, Apr. vol 31, № 4, p 81—83.
5. H. H. Theissing, James Me Cne, Rev. Sci Instr, 1955, Dec. vol 26, № 12, p. 1203—1204.
6. I. S. Seeley, The Proc. of the instut. of elektr. engin., part c, № 7, v. 105, march 1958.

*) А. В. Нетушил, К. М. Поливанов, Основы электротехники, часть третья, стр. 191, Госэнергоиздат, 1956.

Канд. техн. наук доц. Э. П. ГОЛОВАШЕВСКИЙ

НЕКОТОРЫЕ РАСЧЕТЫ ВИБРОНАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАМПЫ

Различный характер колебаний электродов при работе лампы в вибрирующих установках вызывает периодические изменения междуэлектродных расстояний. Это явление приводит к модуляции электронного тока лампы и к возникновению в ее нагрузках переменных электрических напряжений. Очевидно, что возникающие вибронапряжения будут иметь характер помех по отношению к полезным сигналам в нагрузках лампы, и их уровень не должен превышать уровни сигналов. В этой связи оценка величины вибронапряжений является существенной при конструировании лампы и ее элементов.

Влияние ряда факторов, которые в настоящее время не могут быть учтены, например, таких, как отклонение вольтамперной характеристики лампы от установленных аналитических зависимостей, влияние распределения температур в лампе на упругие свойства электродов и т. п., не может гарантировать значительную точность расчета вибронапряжений в реальных конструкциях ламп. В соответствии с этим окончательные расчетные формулы приводятся здесь к достаточно простому виду, удовлетворяющему, однако, приближенным расчетам уровня вибронапряжений. Принятая общая методика позволяет получить и более точные и строгие зависимости как для принятых видов плоских электродов, так и для других форм электродов, например, стержневых и цилиндрических.

Уравнение колебаний плоского электрода, определяющее зависимость координат всех его точек от времени, может быть получено на основе уравнения

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_{mn}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_{mn}} = Q_{mn}; \quad (1)$$

здесь

$L = T - V$ — разность между кинетической энергией (T) и потенциальной (V);

q_{mn} — обобщенная координата, характеризующая определенный тип нормальных колебаний;

Q_{mn} — внешняя обобщенная сила.

При условии, что $Q_{mn} = 0$, уравнение (1) определяет собственные колебания электрода.

Рассмотрим плоский прямоугольный электрод вида пластины (рис. 1).

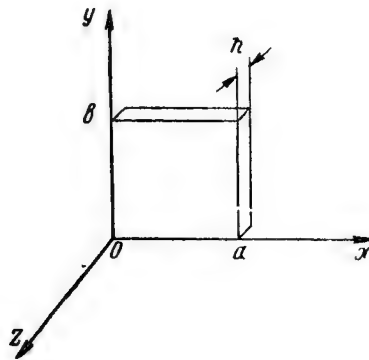


Рис. 1.

В этом случае потенциальная энергия, запасаемая при перемещении, в системе прямоугольных координат, записывается в виде

$$V = \frac{D}{2} \int_0^a \int_0^b \left\{ \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right)^2 + 2\sigma \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + 2(1-\sigma) \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right)^2 \right\} dx dy; \quad (2)$$

здесь

$D = Eh^2/12(1-\sigma^2)$ — жесткость на изгиб;
 E — модуль Юнга;
 σ — коэффициент Пуассона;
 W — прогиб пластины в точке x, y ;
 a, b, h — геометрические размеры пластины.

Кинетическая энергия пластины определяется в виде

$$T = \frac{\gamma h}{2g} \int_0^a \int_0^b \dot{W}^2 dx dy, \quad (3)$$

где

γ — удельный вес;
 g — земное ускорение;
 $\gamma h/g$ — масса на единицу площади.

Величину прогиба прямоугольного электрода, закрепленного вдоль границ, можно записать в виде рядов из нормальных отклонений

$$W = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}. \quad (4)$$

Подстановка (4) в (2) дает

$$V = \frac{\pi^4 ab}{8} D \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn}^2 \left[\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right]^2 \quad (5)$$

и соответственно (4) в (3)

$$T = \frac{\gamma h}{2g} \frac{ab}{4} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \dot{q}_{mn}^2. \quad (6)$$

Уравнение Лагранжа на основе (5) и (6) получится в виде

$$ab \frac{\gamma h}{4g} \ddot{q}_{mn} + \pi^4 D q_{mn} \left[\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right]^2 ab = Q_{mn}; \quad (7)$$

при $Q_{mn} = 0$ (7) можно записать

$$\ddot{q}_{mn} + (2\pi f_{mn})^2 q_{mn} = 0, \quad (8)$$

где f_{mn} — частоты собственных колебаний, равные

$$f_{mn} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{gD}{\gamma h} \left[\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right]}; \quad (9)$$

при $a = b$ и $m = n = 1$ частота собственных колебаний

$$f_{11} = \frac{\pi}{a^2} \sqrt{\frac{gD}{\gamma h}}. \quad (10)$$

Принимаем далее, что на все элементы пластины действует равномерно распределенная сила, меняющаяся по гармоническому закону

$$z = m_1 k g \cos \omega t,$$

где

$$m_1 = \gamma h / g;$$

k — отношение действующего на пластину ускорения к величине земного ускорения g . В этом случае обобщенная сила должна быть записана в виде

$$Q_{mn} = \int_0^a \int_0^b z_0 \cos \omega t \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy;$$

при m и n нечетных

$$Q_{mn} = z_0 \frac{4ab}{mn\pi^2} \cos \omega t, \quad (11)$$

где $z_0 = m_1 kg = \gamma hk$.

Подстановка (11) в (7) дает

$$\ddot{q}_{mn} + (2\pi f_{mn})^2 q_{mn} = \frac{16kg}{mn\pi^2} \cos \omega t. \quad (12)$$

Исключая частное решение (12), зависящее от затухания, и рассматривая только вынужденные колебания в стационарном режиме, для q_{mn} имеем

$$q_{mn} = \frac{16kg}{\pi^2 mn} \frac{\cos \omega t}{(2\pi f_{mn})^2 - \omega^2}. \quad (13)$$

Решение вынужденного колебания получится суммированием всех нормальных колебаний q_{mn} в соответствии с принятым видом (4)

$$W = \sum_{n=1}^m \sum_{m=1}^n \frac{16kg}{\pi^2 mn} \frac{\sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}}{p_{mn}^2 - \omega^2} \cos \omega t; \quad (14)$$

$$p_{mn} = 2\pi f_{mn}.$$

Принимая условие $p_{mn} \gg \omega$, имеющее место в практических случаях, можем пренебречь величиной $\frac{\omega^2}{p_{mn}^2}$ по сравнению с единицей.

Раскрывая двойную сумму (14), можно, с учетом $p_{mn} \gg \omega$, записать

$$W = \frac{16kg}{\pi^2} \frac{1}{p_{11}^2} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \cos \omega t +$$

$$+ \frac{16kg}{3\pi^2} \frac{1}{p_{13}^2} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{3\pi y}{b} \cos \omega t. \quad (15)$$

Отношение максимального значения 2-го члена к максимальному значению 1-го члена ряда составляет

$$p_{11}^2 / 3p_{13}^2 \ll 1.$$

Ограничиваясь одним членом в расчете отклонения W , будем иметь точность порядка $10^0/0$, при этом

$$W(x, y, t) = \frac{4ka^4 \gamma h}{\pi^6 D} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \cos \omega t. \quad (16)$$

Полученная величина прогиба (16) может быть принята и для случая вынужденных колебаний электрода, возбуждаемых при гармонических колебаниях его границ с амплитудой

$$A = \frac{kg}{\omega^2}.$$

Этот случай относится к работе ламп в вибрирующей аппаратуре при жестком закреплении электродов в корпусе лампы. Действительно, положив в нашем решении равномерно распределенную силу на поверхности плоского электрода, мы приняли, что все его элементы совершают вынужденные колебания, повторяющие колебания его границы. Это допустимо при достаточной жесткости электрода. Очевидно, что мерой отклонения величины прогиба (16) от его величины в условиях действия вынуждающей силы на границе будет являться отношение амплитуды найденного вынужденного колебания к амплитуде края; так как если бы вынужденные прогибы оказались равными нулю, то вся поверхность пластины следовала бы за движением ее границы, т. е. решения будут справедливы и для вынуждающей силы на границе при $A \gg W$, что имеет место для рассматриваемого случая, так как

$$\omega^2 < p^2, \text{ то } \frac{W}{A} = \frac{16\omega^2}{\pi^2 p_{11}^2} \ll 1.$$

Для применения полученных результатов к приближенному определению собственных частот и амплитуд вынужденных колебаний плоских электродов, имеющих сетчатую структуру, могут быть приведены следующие соображения.

Использование формул (10), (16) для сетчатой структуры может быть допущено путем введения эквивалентных постоянных материала $E_{\text{экв}}$ и $\gamma_{\text{экв}}$. Коэффициент Пуассона следует считать неизменным для сетчатой и сплошной структуры электрода.

По определению имеем

$$\Delta L = PL/EF, \quad (17)$$

где

ΔL — удлинение;

P — сила;

F — сечение материала;

E — модуль Юнга.

Эквивалентные параметры могут быть введены, например, для плоской сетки квадратного плетения из круглых проволок $\varnothing d$ и шага решетки l . В этом случае при замене сплошного электрода сеткой величина площади сечения изменится в отношении

$$F_c/F_s = \frac{\pi d^2}{4lh},$$

где

h — толщина материала электрода равна d ;
 F_c — сечение материала сетки;
 $F_{\text{э}}$ — сечение материала сплошного электрода.

В соответствии с (17) можно полагать, что сечение осталось неизменным, а изменился модуль Юнга E , тогда новый модуль для сплошного электрода, эквивалентного сетке, будет

$$E_{\text{экв}} = E_m \frac{F_c}{F_{\text{э}}} = E_m \frac{\pi d^2}{4hl}; \quad (18)$$

аналогично получаем для

$$\gamma_{\text{экв}} = \gamma_m \frac{v_c}{v_{\text{э}}} = \gamma_m \frac{\pi d^2}{2lh}; \quad (19)$$

здесь

E_m и γ_m — соответственно, модуль Юнга и удельный вес материала сетки;

v_c и $v_{\text{э}}$ — соответственно, объемы материала сетки и материала сплошного электрода.

Для плоского электрода с отверстиями квадратного профиля можно также записать

$$E_{\text{экв}} = E_m \frac{h(l-d)}{lh}, \quad (20)$$

где

d — сторона квадратного отверстия;
 l — шаг решетки;

$$\gamma_{\text{экв}} = \gamma_m \frac{l^2 - d^2}{l^2}. \quad (21)$$

Используя (18), (19), (20), (21) из формулы (10) и (16), можно получить соответственно соотношения между собственными частотами и амплитудами вынужденных колебаний сплошных и сетчатых электродов. Так, например, собственная частота для сетчатых электродов при $l = d = h$ оказывается в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем для сплошного электрода подобной формы, а величины прогибов возрастают в два раза.

Для расчетов вибронапряжений необходимо найти также среднее отклонение $W(x, y)$ по поверхности электрода для любого момента времени t

$$W_{cp}(t) = \frac{1}{ab} \int_0^a \int_0^b W(x, y, t) dx dy. \quad (22)$$

Подстановка (16) в (22) после интегрирования дает

$$W_{cp}(t) = \frac{16ka^4 \gamma h}{\pi^8 D} \cos \omega t.$$

Используя (10), можно также записать для амплитудного значения

$$W_{cp} = \frac{64kg}{\pi^4 p_{11}^2}.$$

Последняя зависимость позволяет приближенно определить величину прогиба пластины другой формы, для которой может быть определена частота основного тона собственных колебаний. Так, например, формула для основного тона f_{01} для электрода в форме круглой пластины имеет вид

$$f_{01} = \frac{2\pi}{d^2} \sqrt{\frac{gD}{h\gamma}} \beta_{01}^2; (\beta_{01} = 1,015);$$

здесь d — диаметр плоского электрода. Из сравнения значений f_{01} с выражением (10) можно заключить, что при $d = a\sqrt{2}$ собственные частоты основных тонов оказываются равными ($f_{01} = f_{11}$), и в этом случае величины прогибов круглой пластины будут при равенстве вынуждающих сил близки к величинам прогибов квадратной пластины.

Наиболее подвижными электродами ламп обычно являются сетки, обладающие сравнительно более низкими резонансными частотами. Для достижения высоких значений крутизны 1-ая сетка располагается на возможно малом расстоянии от катода и определяет главным образом модуляцию тока за счет вибрации. При этом собственные частоты подогревных катодов оказываются значительно больше собственных частот сетки. Это позволяет рассматривать катод неподвижным и принимать прогибы сетки за меру относительного изменения расстояния катод — сетка. В этом случае полученная величина средней амплитуды прогиба позволяет определить виброток и вибронпряжение в анодной нагрузке электронной лампы.

Ток в анодной цепи электронной лампы определяется по формуле

$$I_a = AU_d^{3/2} d_{kc}^2; \quad (23)$$

здесь U_d — действующий потенциал, определяемый соответственно для диода в виде

$$U_{d1} = U_a - R_a I_a,$$

для триода в виде

$$U_{d2} = U_{c1} + D_1 U_a - D_1 I_a R_a,$$

для тетрода и пентода в виде

$$U_{d3} = U_{c1} + D_1 U_{c2} + D_2 (U_a - I_a R_a).$$

Дифференцирование (23) дает значение амплитуды приращения тока I_a при изменении расстояния сетка — катод

$$\Delta I_a = -I_a \frac{2\Delta d_c}{d_c} \frac{1}{1 + SDR_a} \quad (24)$$

и амплитуда вибронапряжения определяется, как

$$U_{\sim} = \Delta I_a R_a;$$

здесь

$$\Delta d_c = W_{cp};$$

d_c — расстояние сетка — катод в неподвижном состоянии;

S — крутизна;

D — проницаемость триода или тетрода соответственно.

Сопоставление расчетов с измерениями величин виброшумов для ламп типа 6С5Д показали совпадение порядков измеренных и рассчитанных величин.

Заключение

Изложенная методика расчетов позволяет провести определение порядка величины виброшумов при конструировании ламп с плоскими электродами.

Установленные зависимости прогибов от геометрии электродов позволяют выбрать размер электродов, удовлетворяющих допустимому уровню виброшумов.

Методика может быть распространена на некоторые другие формы электродов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Р е л е й, Теория звука, Том I, Госиздат, Москва, 1955.
2. С. П. Т и м о ш е н к о, Теория колебаний в инженерном деле.

Ст. преподав. А. В. ДУАКИН

ШУМОВОЙ ДИОД ДЕСЯТИСАНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

1. Введение

Существующие в настоящее время конструкции шумовых диодов затруднительно использовать на больших частотах, так как становится трудно точно определить величину нагрузочного сопротивления, на котором выделяется дробовой шум диода. Кроме того, время, необходимое электронам для того, чтобы пролететь от катода к аноду, становится сравнимым с периодом колебаний. При этом количество эффективного дробового тока значительно уменьшается. Использование для этих целей клистрона, в котором можно достигнуть малых углов пролета, в качестве шумового генератора также затруднительно, так как нельзя точно рассчитать нагрузку, на которую он работает, и поэтому не представляет возможным теоретически предсказать его шумовой выход. Величина дробового шума, даваемого диодом, может быть увеличена путем уменьшения времени пролета электронов между катодом и анодом. Последнее может быть достигнуто двумя путями: 1) либо уменьшая расстояние между катодом и анодом, 2) либо увеличивая анодное напряжение диода.

Однако уменьшение расстояния между электродами ограничено трудностями конструктивного выполнения лампы, а увеличение анодного напряжения ограничено допустимой мощностью рассеяния анода. Поэтому для достижения достаточных мощностей дробового шума диода, при наличии заметного влияния времени пролета, приходится увеличивать его анодный ток. Второй трудностью, встречающейся при конструировании шумовых диодов для работы на больших частотах, является трудность такого сочленения шумовых диодов с волноводами и коаксиальными фидерами, при котором можно было бы точно определить его нагрузочное сопротивление и обеспечить передачу генерируемой диодом мощности шумов без потерь. Эти трудности преодолеваются описанной ниже конструкцией шумового диода [1, 2].

II. Описание конструкции лампы

Сконструированный шумовой диод выполнен в виде коаксиальной линии, внутренним проводником которой является катод,

а наружным — цилиндрический анод. Выступающие из анода концы катода служат антеннами, возбуждающими волноводы при работе диода в установке. Оба конца анода и катода снабжены специальными устройствами, представляющими собой четвертьволновые отрезки коаксиальных линий, замкнутых с одного конца. Такими же устройствами снабжены отверстия в волноводах, в которые вставляется лампа. Назначение этих устройств — предотвратить потери мощности сверхвысокой частоты. Лампа представляет собой цельно стеклянную конструкцию. Для ее изготовления использовано стекло типа „нонекс“, обладающее малыми диэлектрическими потерями.

Основное требование, предъявляемое к катоду в шумовом диоде, состоит в том, чтобы получить явно выраженный ток

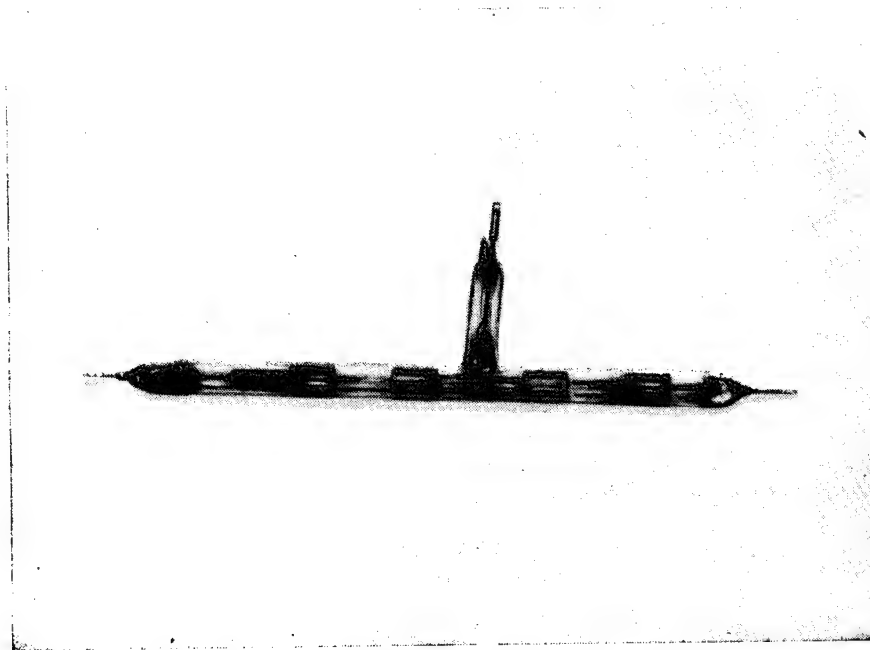


Рис. 1.

насыщения. Этому требованию хорошо удовлетворяет вольфрамовый катод, который и применен в настоящей лампе. Ввиду того, что в рабочем состоянии длина нити накала шумового диода возрастает, одна из траверз накала сделана подвижной и снабжена вольфрамовой пружиной. Благодаря этому, нить накала лампы все время находится в натянутом состоянии, что предот-

вращает ее провисание при нагреве и возможность короткого замыкания катода с анодом. На рис. 1 дан внешний вид лампы. Основные геометрические размеры лампы следующие:

- | | |
|--|-----------|
| 1) длина лампы | — 400 мм |
| 2) диаметр лампы | — 19,5 мм |
| 3) диаметр отверстия анода | — 1,5 мм |
| 4) диаметр катода | — 0,1 мм |
| 5) длина четвертьволновых отрезков коаксиальных
линий | — 25 мм |
| 6) расстояние между их торцами | — 34 мм |

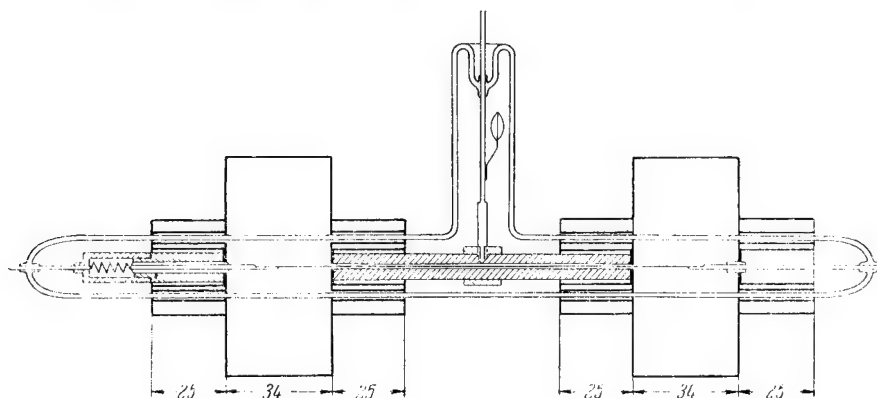


Рис. 2.

На рис. 2 приведен схематический чертеж, поясняющий включение лампы в волноводы. Из рисунка 2 видно, что дробовой шум, образующийся в коаксиальной линии, составленной из катода и анода диода, распространяется вдоль ее и излучается выступающими концами катода, являющимися антеннами, возбуждающими волноводы.

III. Формула для расчета тока шумов диода при сверхвысоких частотах

Для малых углов пролета среднеквадратичное значение шумового тока диода в режиме насыщения равно

$$I_{ш}^2 = 2eI_0\Delta f = 3,2 \cdot 10^{-19} I_0 \Delta f, \quad (1)$$

где

- e — заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19} k$;
- I_0 — анодный ток в амперах;
- Δf — полоса пропускания в герцах.

При повышении частоты, когда начинает влиять время пролета и нельзя считать электронный ток одним и тем же в раз-

ных сечениях междуэлектродного промежутка, шумовой ток будет за счет усреднения его вдоль зазора между катодом и анодом падать и окажется меньше, чем это следует из формулы (1).

Для того, чтобы учесть влияние времени пролета, следует использовать теорию проводимости электронных ламп для сверхвысоких частот [3, 4, 5]. Воспользуемся результатами этой теории. Как было показано [5], разность потенциалов между катодом и анодом плоского диода может быть представлена следующим выражением

$$-U_1 = \frac{1}{\epsilon} J_1 A + \frac{1}{\epsilon} g_a B + \frac{hm}{e} \mu_a C, \quad (2)$$

где

U_1 — разность потенциалов;
 $\epsilon = \frac{1}{36\pi \cdot 10^{11}} = 8,95 \cdot 10^{-14}$ — диэлектрическая постоянная вакуума;
 J_1 — плотность переменного тока через диод;
 g_a — плотность переменной слагающей тока проводимости у катода;
 μ_a — переменная скорость электронов у катода;
 h — коэффициент, равный 10^{-7} ;
 e — заряд электрона;
 m — масса электрона;

$$A = \frac{x}{j\omega} + \frac{eI_0}{hm\epsilon\omega^4} (2 - 2e^{-j\xi} - j\xi - j\xi e^{-j\xi});$$

$$B = j \frac{1}{\omega^3} [a_a (j\xi e^{-j\xi} + e^{-j\xi} - 1) + U_a j\omega (e^{-j\xi} - 1)];$$

$$C = \frac{eI_0}{hm\epsilon\omega^2} [j\xi e^{-j\xi} + e^{-j\xi} - 1].$$

В приведенных выражениях для A , B , C , в свою очередь

ω — угловая частота;
 ξ — угол пролета, равный $\xi = \omega\tau$, где τ — время пролета;
 J_0 — плотность постоянной слагающей тока через анод;
 U_a — постоянная скорость электронов у катода;
 a_a — постоянное ускорение электронов у катода.

Если диод работает в режиме насыщения, то выражение (2) значительно упрощается. В режиме насыщения мал пространственный заряд и, следовательно, малы плотности постоянного тока J_0 и скорость электронов у катода μ_a по сравнению с ускорением электронов у катода g_a (поле анода при отсутствии пространственного заряда достигает катода). При этом, подставляя

значения A , B и C в формулу (2) и пренебрегая членами, содержащими в качестве множителей J_0 и μ_a , получим

$$-U_1 = \frac{J_1}{j\omega\epsilon} x - g_a \frac{1}{j\omega e} a_a (j\xi e^{-j\xi} + e^{-j\xi} - 1). \quad (2)$$

При отсутствии пространственного заряда в плоском диоде будем иметь равноускоренное движение электронов и ускорение электронов будет все время равно a_a . При этом путь x , пройденный электронами, будет связан с временем движения электронов τ соотношением

$$x = \frac{1}{2} a_a \tau^2. \quad (3)$$

Если площадь электродов равна F_s , то через сопротивление нагрузки Z_f протекает ток $I_1 = F_s J_1$. При этом $U_1 = I_1 Z_f = F_s J_1 Z_f$ и из (2) получаем

$$I_1 = F_s J_1 = \frac{1}{\frac{x}{j\omega\epsilon F_s} + Z_f} \frac{g_a a_a}{j\omega^2 \epsilon} (j\xi e^{-j\xi} + e^{-j\xi} - 1). \quad (4)$$

Используя (3), можем применить замену

$$\frac{a_a}{j\omega\epsilon} = \frac{\frac{1}{2} a_a \tau^2}{j\omega\epsilon} \frac{2}{\omega^2 \tau^2} = \frac{x}{j\omega\epsilon} \frac{2}{\xi^2}$$

в (4) и получить из последнего

$$I_1^2 = \left| \frac{g_a}{1 + \frac{Z_f}{\frac{x}{j\omega\epsilon F_s}}} \right|^2 \frac{4}{\xi^4} [\xi^2 + 2(1 - \xi \sin \xi - \cos \xi)]. \quad (4')$$

Применим это выражение к случаю, когда ток g_a есть шумовой ток диода, определяемый формулой (1). Учитывая при этом, что $\frac{F_s \epsilon}{x} = C$ есть емкость нашего диода, можем получить на основании (1) и (4'):

$$I_{ш}^2 = \frac{2e I_0 \Delta f}{\left| 1 + \frac{Z_f}{\frac{1}{j\omega C}} \right|^2} F = \frac{3,2 \cdot 10^{-19} I_0 \Delta f}{\left| 1 + \frac{Z_f}{j\omega C} \right|^2} F, \quad (5)$$

где

F — функция, определяющая влияние времени пролета и равная

$$F = \frac{4}{\xi^4} [\xi^2 + 2(1 - \xi \sin \xi - \cos \xi)]. \quad (6)$$

Эта функция приведена на рис. 3.

Приведенный выше расчет совершенно справедлив для плоского диода. Для цилиндрического диода применение этой функции может быть сделано с погрешностью, меньшей 10%, если

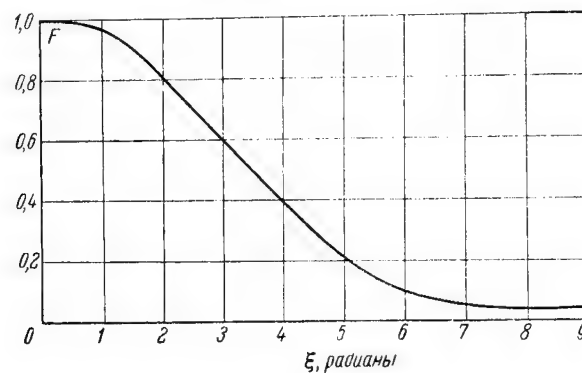


Рис. 3.

угол пролета, подставляемый в формулу (6), рассчитан применительно к цилиндрической конструкции электродов. Для этой цели можно воспользоваться следующим выражением:

$$\xi = \omega\tau = \omega G \frac{3,36 \cdot 10^{-8} (r_a - r_f)}{\sqrt{U_a}},$$

где

- ω — угловая частота;
- G — поправка, учитывающая влияние цилиндрической конструкции электродов на время пролета;
- r_a и r_f — соответственно радиусы анода и катода;
- U_a — потенциал анода.

Поправка G оказывается меньше единицы, так как при цилиндрической конструкции электродов, когда потенциал между элект-

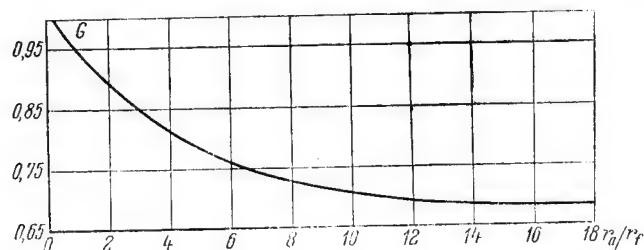


Рис. 4.

тродами распределен по логарифмическому закону, поле у катода выше, чем в плоской конструкции, и электроны уже в на-

чале своего пути набирают большую скорость и потому быстрее достигают анода. На рис. 4 приведен график величины G как функции отношения $\frac{r_a}{r_f}$.

Экспериментальная проверка (4) показывает, что поправка на влияние пролета F , вычисленная выше, хорошо совпадает с опытом в диапазоне значений анодных напряжений 40—200 в.

IV. Расчет мощности шумов в сконструированном диоде

Выше мы нашли, что влияние времени пролета может быть учтено коэффициентом F , величина которого может быть взята из графика на рис. 3. Далее, мы должны учесть влияние нагрузки. Сконструированный диод в виде коаксиальной линии работает на согласованную нагрузку. Генерируемый диодом шумовой ток делится между нагрузкой и внутренним сопротивлением диода, причем ток в нагрузке оказывается вдвое меньше. При этом среднеквадратичное значение может быть определено выражением

$$\bar{I}_m^2 = 8 \cdot 10^{-20} I_0 \Delta f F. \quad (8)$$

Так как наш диод представляет собой коаксиальную резонансную линию, то при согласовании его с волноводами на концах линии устанавливаются сопротивления, равные волновому ее сопротивлению

$$Z_0 = 138 \lg \frac{r_a}{r_f}. \quad (9)$$

Следовательно, величина мощности шумов, отдаваемых в волновод, будет

$$P_m = \bar{I}_m^2 Z_0 = 8 \cdot 10^{-20} I_0 \Delta f Z_0 F. \quad (10)$$

При распространении шумов вдоль линии, образованной нашим диодом, и затем по волноводному тракту к приемнику часть их мощности будет потеряна. Величина потери мощности может быть найдена путем измерения затухания колебаний стандарт-сигнала на пути от одного волновода через диод до второго волновода. Если подаваемая мощность равна P_1 , а получаемая на выходе равна P_2 , то поправочный коэффициент, который следует ввести в формулу 10, будет

$$H = \frac{P_1 - P_2}{P_1}.$$

При учете поглощения шумов в линии анод-катод диода окончательно получим

$$P_m = 8 \cdot 10^{-20} I_0 \Delta f F H Z_0. \quad (11)$$

Зная величину мощности шумов, поставляемых диодом, можем экспериментально найти и величину коэффициента шума прием-

ника. Это определение при наличии согласования диода с волноводом может быть произведено следующим образом.

При выключенном питании диода на выходе приемника наблюдаются только собственные шумы приемника. Включение диода увеличивает мощность шумов на выходе приемника. Если это увеличение составляет μ раз, то шумовой коэффициент приемника может быть подсчитан по следующей формуле:

$$N = \frac{\frac{1}{2} e I_0 Z_0 \Delta f F H}{k T_0 \Delta f (\mu - 1)} = \frac{20 \cdot I_0 Z_0 F H}{\mu - 1}, \quad (12)$$

где, как обычно, $k T_0 \Delta f$ есть мощность шумов идеального приемника.

V. Измерение чувствительности приемника с помощью сконструированного шумового диода

На рис. 5 представлена блок-схема экспериментальной установки для измерения чувствительности приемников с помощью шумового диода.

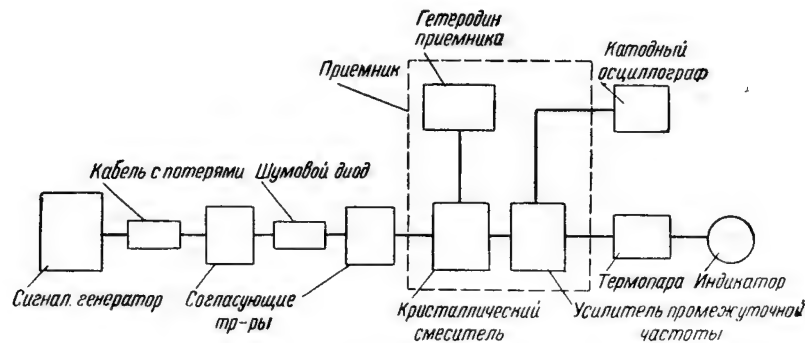


Рис. 5.

Первый шаг в проведении измерений состоит в том, чтобы согласовать диод со входом приемника на одном конце и с кабелем с большими потерями на другом. Для этого, используя сигнал-генератор как источник сигнала на рабочей частоте приемника, регулируем положение поршней волноводов таким образом, чтобы получить минимум вносимых потерь, что будет соответствовать наибольшему значению сигнала на выходе приемника. Чтобы проверить наличие полного согласования, измеряются вносимые потери в зависимости от частоты. Для этого изменяем частоту сигнал-генератора и настраиваем приемник (гетеродин), сохраняя установленное ранее положение согласующих поршней в волноводах. Если вносимые потери почти постоянны по широкому диапазону частот, то имеет место хорошее согласование. Проводя согласование шумового диода с приемником, находят

поправку на затухание, о которой было сказано выше. После этого проводят измерение чувствительности приемника. Для облегчения расчетов формула мощности дробового шума диода может быть упрощена и представлена в следующем виде:

$$P_{ш} = A \Delta f I_0 H, \quad (13)$$

где

$$A = \frac{e Z_0 F}{2}.$$

Ниже приводится таблица величин A , необходимых для расчета мощности шумов при работе диода с разными анодными напряжениями.

$U_a, \text{ в}$	ξ	F	A
100	2,96	0,605	$77,8 \cdot 10^{-19}$
200	2,09	0,79	$101,8 \cdot 10^{-19}$
300	1,71	0,865	$111 \cdot 10^{-19}$

VI. Заключение

Выше приведен материал, относящийся к разработке специального шумового диода и к его использованию для измерения чувствительности приемника десятисантиметрового диапазона. Точность измерений с таким диодом имеет порядок 1 децибел, т. е. 26%. Анализируя формулу (13), можно установить аналитически величину ошибки. Так как измерение величины тока I_0 может быть сделано весьма точно, то на практике заметная ошибка будет иметь место только за счет определения величин A , Δf и H . Значение A определяется величиной волнового сопротивления линии Z_0 , которое может быть вычислено с большой степенью точности, и поправкой F . Однако, как показал опыт, при небольших анодных напряжениях теоретическое значение F не отличается заметным образом от экспериментального. Таким образом, существенным для точности измерений оказываются только погрешности величин Δf и H . Последние всегда будут находиться с известным приближением и точность их определения должна быть учтена при расчете ошибки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет по научно-исследовательской работе. ЛЭТИ, кафедра РТЭ, 1951.
2. R. Kampinger, I. Hatton, E. Schneider, L. A. C. Dusek, JIEE, т. 93, 3A, 1436, 1946.
3. Ю. А. Кацман. Теория проводимости электронных ламп, ЖТФ, стр. 1824—1835, 1938.
4. Г. А. Гринберг, Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений, изд-во АН СССР, 1948.
5. Ф. Б. Левеллин, Инерция электронов, ОГИЗ, 1946.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
К. И. Крылов — О некоторых новых методах генерирования электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов	3
А. Д. Сушков — О влиянии диаметра электронного потока и металлического экрана на группирование электронов	27
Э. И. Голованевский — О формировании электронных пакетов	44
В. М. Николаев — О модуляции по скорости релятивистских электронов в высокочастотном зазоре резонатора при больших сигналах	57
К. И. Крылов, В. Л. Федоров — Некоторые вопросы автоэлектронной эмиссии	68
К. И. Крылов, А. Г. Бонч-Осмоловский — Импульсные магнитные поля большой напряженности	78
К. И. Крылов, К. С. Рожнов — Экспериментальное исследование электрических полей при наличии пространственного заряда	94
С. И. Молоковский — Оценка расфокусирующих сил объемного заряда в клистроне в условиях динамического режима	113
А. В. Кузнецова, С. И. Молоковский — Фокусировка магнитным полем системы соленоидов электронного потока с большим значением пространственного заряда	125
А. В. Дракин, В. С. Медовиков — Об эффекте нейтрализации пространственного заряда луча положительными ионами	130
К. И. Крылов, В. Н. Рудаков — Применение интерферометра Майкельсона для определения электрических параметров веществ при сверхвысоких частотах	139
Э. И. Голованевский — Некоторые расчеты вибронапряжений электронной лампы	150
А. В. Дракин — Шумовой диод десятиметрового диапазона	158

STAT

Page Denied

Замеченные опечатки

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
14	29	$m_0\omega_0$	то ω_0
43	25	elocity	velocity
43	31	Frebueney	Frequency
95	40	Δ^2U	∇^2U
96	4	Δ^2V	∇^2V
96	22	током, вводимым элект- ролит	током, вводимым в элект- родит

STAT

Page Denied

**ИЗВЕСТИЯ
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА
ИМЕНИ В. И. УЛЬЯНОВА
(ЛЕНИНА)**

ВЫПУСК XXXIV

**ЛЕНИНГРАД
1958**

ИЗВЕСТИЯ
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА
имени В. И. УЛЬЯНОВА
(ЛЕНИНА)

ВЫПУСК XXXIV

(Год издания 56-й)

ЛЕНИНГРАД
1958

STAT

Page Denied

Sanitized Copy Approved for Release 2010/04/27 : CIA-RDP80T00246A045400100001-6



АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ ФАТЕЕВ

Sanitized Copy Approved for Release 2010/04/27 : CIA-RDP80T00246A045400100001-6

Заслуженный деятель науки и техники

АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ

ФАТЕЕВ

**К 60-летию со дня рождения и 33-летию научно-педагогической
деятельности в Ленинградском электротехническом институте
им. В. И. Ульянова (Ленина)**

Александр Васильевич ФАТЕЕВ родился в 1897 году в Петербурге. После окончания реального училища он поступил в ЛЭТИ. Еще будучи студентом Александр Васильевич проявил незаурядные способности к научной работе, его глубокие знания обратили на себя внимание профессора С. А. Ринкевича, привлечшего его к работе над монографией по электроприводу. После окончания института в 1924 году Александр Васильевич был оставлен при кафедре электрификации фабрик и заводов в качестве преподавателя.

Молодому ученому пришлось много работать над созданием новых курсов и лабораторий. Одновременно он вел большую научную работу по исследованию режимов работы электрооборудования на предприятиях Ленинграда.

В 1938 году за научные работы, результаты которых были опубликованы в печати, А. В. ФАТЕЕВУ присваивается ученая степень кандидата технических наук и ученое звание доцента.

В трудные годы Великой Отечественной войны Александр Васильевич с группой специалистов ЛЭТИ остается в блокированном Ленинграде, работая над решением насущных проблем технического оснащения боевых кораблей Военно-Морского Флота новыми приборами и одновременно ведет педагогическую работу с оставшимися в Ленинграде студентами.

После окончания войны он был назначен заведующим кафедрой автоматики и телемеханики ЛЭТИ. Это были тяжелые годы — лаборатории пришлось создавать практически заново, не было нужных приборов, не хватало оборудования, плохо было с помещениями, часть преподавателей находилась еще в рядах Советской Армии;

тем не менее Александр Васильевич сумел сплотить коллектив, трудности были преодолены и кафедра вновь начала жить нормальной жизнью. Одновременно необходимо было коренным образом переработать как учебные программы, так и содержание курсов, так как за годы войны техника шагнула далеко вперед, особенно в области автоматики и телемеханики. В частности возник специальный весьма сложный курс теории автоматического регулирования и А. В. ФАТЕЕВ берет на себя его чтение. Не хватает научных кадров, кафедра во главе с Александром Васильевичем начинает подготовку через аспирантуру молодых ученых из числа наиболее способной молодежи, оканчивающей ЛЭТИ. Многие из них впоследствии были оставлены при институте в качестве преподавателей, остальные пополнили родственные кафедры в других институтах, а также заняли руководящие должности в соответствующих отделах научно-исследовательских учреждений нашей Родины.

Наряду с этим Александр Васильевич руководит большими научными работами как на кафедре автоматики и телемеханики ЛЭТИ, так и в Институте электромеханики АН СССР, постоянно консультирует завод им. Свердлова, помогая промышленности в освоении автоматики и электрооборудования для новых типов современных станков.

В период 1952—53 годов А. В. ФАТЕЕВ состоит в докторантуре при институте автоматики и телемеханики АН СССР. Его докторская диссертация на тему: „Методика определения параметров корректирующих связей для автоматизированных систем“ явилась новым вкладом в теорию автоматического регулирования и была им успешно защищена в 1953 г. В этом же году А. В. ФАТЕЕВУ присваивается ученое звание профессора.

Перу А. В. ФАТЕЕВА принадлежит свыше 40 научных работ, им написан ряд учебников и учебных пособий, широко известных как в нашей стране, так и за ее пределами. Достаточно указать на такие книги, как: „Электрооборудование подъемных и транспортных механизмов промышленных предприятий“, „Сборник примеров и задач по теории электрического привода“ „Основы линейной теории автоматического регулирования“.

Все годы Александр Васильевич ведет большую общественную работу как в самом институте, так и в Областном комитете профсоюза работников высшей школы. В 1956 г. трудящиеся Петроградского района избрали его депутатом Ленинградского Городского Совета.

За заслуги перед советской наукой А. В. ФАТЕЕВ награжден орденом Трудового Красного Знамени и удостоен высокого звания заслуженного деятеля науки и техники.

**СПИСОК
важнейших научных трудов профессора А. В. ФАТЕЕВА**

1. Электрическое оборудование подъемных кранов, ЛЭТИ, 1931.
2. Электродвигатели, Энергоиздат, 1933.
3. Испытание электродвигателей, Энергоиздат, 1933.
4. Электрический привод в промышленности, Энергоиздат, 1933.
5. Выбор рода тока для перегрузочных механизмов в портах, ЦНИИВТ, 1934.
6. Примерные расчеты по электроприводу (совм. с Б. И. Норневским), Энергоиздат, 1933.
7. Технические характеристики компенсированных электродвигателей, Энергоиздат, 1933.
8. Электрооборудование портовых механизмов, Энергоиздат, 1934.
9. Исследование работы электроподвесных дорог, НИИПТ, 1935.
10. Электрооборудование механизмов внутриводского транспорта, Энергоиздат, 1936.
11. Руководство к лабораторным работам по электрическому приводу, ЛЭТИ, 1939.
12. Сборник примеров и задач по электрическому приводу (совместно с Б. И. Норневским), Энергоиздат, 1939.
13. Аппаратура для корабельных электроприводов, Военмориздат, 1940.
14. Электрические лебедки и краны, Военмориздат, 1940.
15. Электрооборудование подъемных и транспортных механизмов промышленных предприятий, Энергоиздат, 1941.
16. Фотоэлектронное управление в автоматически действующих копирующих устройствах, Конфер. по автомат. эл. приводу, 1944.
17. Сборник примеров и задач по теории электрического привода (совместно с Б. И. Норневским), Энергоиздат, 1951.
18. Методика определения параметров корректирующих связей для автоматизированных систем, Докторская диссертация, 1953.
19. Основы линейной теории автоматического регулирования, Энергоиздат, 1954.
20. Графоаналитический метод выбора параметров корректирующих обратных связей, Энергоиздат, 1954, Труды 2-го Всесоюзного совещания по теории автом. регул., 1955.

21. Пособие к лабораторным работам по теории автоматического регулирования (совместно с В. И. Анисимовым и А. А. Вавиловым), ЛЭТИ, 1956.
 22. Построение амплитудно-фазовой характеристики системы автоматического управления, удовлетворяющей заданным качественным показателям, Известия ЛЭТИ, вып. XXIX, 1957.
 23. Анализ работы и расчет элементов электрического привода (совместно с М. Е. Верхолат), Машгиз, 1957.
 24. Способ улучшения характеристик электромашинных усилителей с поперечным полем (совместно с А. А. Вавиловым и В. А. Олейниковым), Вестник электропромышленности, № 8, 1956.
-

Канд. техн. наук, доц. Р. И. ЮРГЕНСОН

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАССИВНОЙ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ШАГОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

А. Параметрические коды, обнаруживающие одну или несколько ошибок при использовании различных методов обеспечения пассивной помехоустойчивости

В зависимости от используемых принципов избирания и типа синхронизации, пассивная помехоустойчивость системы может быть обеспечена различными путями.

В избирательных системах, использующих шаговую принцип синхронизации, пассивная помехоустойчивость обеспечивается следующим образом:

- 1) Применением защитных устройств, обнаруживающих искажение общего числа элементов кода.
- 2) Применением защитных устройств, обнаруживающих искажение временных параметров кода.
- 3) Применением защитных устройств, обнаруживающих искажения импульсных признаков кода (этот вид защитных устройств получил применение главным образом в системах, работающих по проводным линиям связи).
- 4) Применением защитных устройств от запуска системы случайными импульсами помехи.
- 5) Применением кодовых комбинаций, способных обнаруживать ошибки.
- 6) Применением защитных устройств, обнаруживающих искажение числа избирающих элементов кода.

1. Защита, обнаруживающая искажение общего числа элементов кода

В избирательных системах с шаговой синхронизацией, получивших наибольшее распространение в промышленной телемеханике, общее число элементов кода принимается постоянным. Это дает

возможность обнаружить искажения кода, вызываемые воздействием помехи как при увеличении, так и при уменьшении общего числа элементов. Как правило, защита, обнаруживающая искажение общего числа элементов кода, осуществляется измерением времени задержки приемного распределителя в исходном или рабочем положении. Измерение времени задержки распределителя в исходном или рабочем состоянии дает возможность обнаружить искажение общего числа элементов кода как в меньшую, так и в большую сторону. Таким образом, защита, обнаруживающая искажения общего числа элементов кода, дает возможность отличить правильные и неправильные коды и исключить возможность ложного срабатывания системы при нарушении нормального приема кода.

Рассмотрим теперь применение защиты, обнаруживающей искажения общего числа элементов кода, на структурной схеме декодирующего устройства, обеспечивающего выявление время-импульсно-интервального кода, приведенной на рис. 1. Из рис. 1 видно, что структурная схема декодирующего устройства отличается от

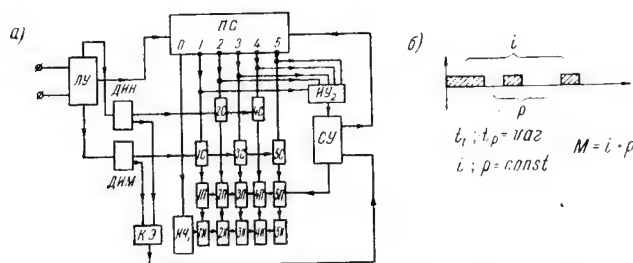


Рис. 1. Структурная схема декодирующего устройства

а - структурная схема приемного устройства,
б - код, на который настроено приемное устройство

обычной приемной схемы распределителя наличием дополнительных элементов, обеспечивающих защиту от искажения общего числа элементов кода. Такими дополнительными элементами являются: первое интегрирующее устройство ИУ₁, обеспечивающее измерение длительности остановки распределителя в нулевом исходном положении и разрешающее исполнение команд при правильной работе приемной схемы; второе интегрирующее устройство ИУ₂, обеспечивающее измерение длительности остановки распределителя в рабочих положениях и приводящее, с помощью сбрасывающего устройства СУ, приемную схему в исходное состояние при искажении общего числа элементов в коде; комплект приемных реле 1П—5П, фиксирующих-запоминающих выявленные кодовые элементы, и комплект исполнительных реле 1И—5И, обеспечивающих исполнение команд только при приеме правильного кода.

Защита, обнаруживающая искажения общего числа элементов, проиллюстрирована в данном случае на структурной схеме деко-

дирующего устройства, предназначенного для приема время-импульсно-интервального кода, так как временные коды получили наиболее широкое применение в различных промышленных устройствах телемеханики. Необходимо отметить, что аналогичную структурную схему будут иметь декодирующие устройства, использующие другие типы импульсных признаков и имеющие защиту от искажения общего числа элементов кода.

Устройства, обнаруживающие искажение общего числа элементов кода, получили применение во всех существующих системах телеуправления и телесигнализации с шаговой синхронизацией.

2. Защита, обнаруживающая искажение временных параметров кода

Защита, обнаруживающая искажение временных параметров кода, может быть применена в избирательных системах, предназначенных для приема любого параметрического кода. Этот вид защиты дает возможность обнаружить искажения временных параметров в полярно-импульсных, амплитудно-импульсных, частотно- и число-импульсных кодах. В время-импульсных, время-интервальных и время-импульсно-интервальных кодах соответственно имеется возможность обнаружить искажение удлиненных элементов в большую сторону и искажение элементов, имеющих постоянную длительность. Один из вариантов схемы, обнаруживающий искажение временных параметров кода, приведен на структурной схеме рис. 1. Из рисунка видно, что устройство, выявляющее удлиненные элементы ДИМ и ДИН, при искажениях удлиненных элементов в большую сторону воздействуют на схему контроля удлиненного элемента КЭ, которая приводит в действие сбрасывающее устройство СУ. В результате декодирующее устройство приходит в исходное состояние, исключив возможность неправильного срабатывания избирательной системы.

Устройства, обнаруживающие искажение временных параметров кода, получили также применение во всех системах телеуправления и телесигнализации с шаговой синхронизацией.

3. Защита, обнаруживающая искажение импульсных признаков кода

Защита, обнаруживающая искажение импульсных признаков кода, как правило, используется в сочетании с защитой, обнаруживающей искажения общего числа элементов кода, и может быть осуществлена только в тех случаях, когда на месте выдачи кодов имеется возможность осуществить прием передаваемого кода в линейной цепи. Наиболее просто рассматриваемый принцип передач и приема кода осуществляется по проводным линиям связи. Однако при определенных условиях этот принцип может быть применен также при использовании высокочастотных каналов на высоковольтных линиях электропередачи.

При использовании указанного выше метода передачи и приема кода можно осуществить сопоставление каждого переданного элемента кода с принятым и тем самым обнаружить любое искажение кодового элемента, вызванное действием помехи в линейной цепи. Структурная схема, иллюстрирующая этот принцип обнаружения ошибок, приведена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что каждый выдаваемый элемент кода сравнивается с кодовым элементом, принятым из линейной цепи схемой выявления искажений импульсных признаков ВИ.

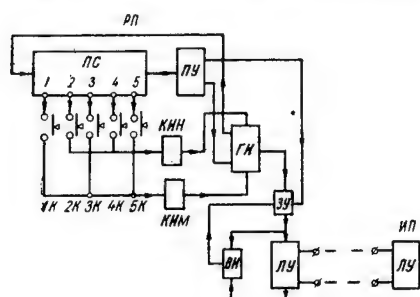


Рис. 2. Структурная схема кодирующего устройства с защитой, обнаруживающей искажения временных импульсных признаков кода

При обнаружении искажений схема ВИ воздействует на запирающее устройство ЗУ, которое исключает возможность дальнейшей передачи кода в линию. Срабатывание ЗУ приводит к передаче с РП на ИП кода с искаженным общим числом элементов, которое выявляется в декодирующем устройстве схемой защиты, обнаруживающей искажения общего числа элементов кода. Такой вид защиты может быть применен для обнаружения искажений импульсных признаков в число-импульсных, время-импульсных, время-интервальных,

время-импульсно-интервальных, амплитудно-импульсных, полярно-импульсных, частотно-импульсных и позиционно-импульсных кодах.

Конкретное применение защита, обнаруживающая искажение импульсных признаков в коде, получила в системах телеуправления, разработанных советскими авторами СК-1 [1] и КРП [2] и в американской самозащищающей системе телеуправления фирмы Вестингауз [3].

4. Защита, обнаруживающая искажение пускового элемента

Для исключения запуска приемного устройства от воздействия импульсов помехи в системах с шаговой синхронизацией используются защиты, обнаруживающие искажение пускового элемента. Эта защита имеет важное значение потому, что при запуске системы импульсами помехи приемное устройство приходит в исходное состояние не сразу, а по истечении определенного времени, равного времени восстановления приемного устройства. Если до истечения времени восстановления начнется передача сообщения, то очевидно, что нормальный прием кода будет невозможен.

Для исключения запуска системы случайными импульсами пусковой элемент, как правило, имеет отличную от кодовых элементов длительность. Это дает возможность применением простейших схем

обеспечить запуск системы только при поступлении пускового элемента заданной длительности и, стало быть, обнаружить искажение пускового элемента при поступлении импульсов с неправильной длительностью. Конкретное применение этот вид защиты получил в системах телеуправления РТУ [1], ВРТ [2, 4, 5], КРП [2] и др.

5. Кодовые комбинации, обнаруживающие ошибки

В избирательных системах с шаговым принципом синхронизации, использующих комбинационно-распределительный или комбинационно-распределительно-разделительные принципы избирания, пассивная помехоустойчивость может быть обеспечена применением кодовых комбинаций, обнаруживающих одну или несколько ошибок.

Общая идея отбора кодовых комбинаций, обнаруживающих ошибки, состоит в том, что к кодовым элементам, используемым для формирования обычного кода, добавляются дополнительные элементы или дополнительные токовые импульсные признаки для обнаружения ошибок. Дополнительные элементы и токовые импульсные признаки, увеличивая число элементов комбинирования и соответственно общее число возможных кодов, дают возможность отобрать такие кодовые комбинации, которые можно отличить друг от друга при заданном числе ошибок. Таким образом, рассматриваемый принцип обеспечения пассивной помехоустойчивости характеризуется обязательным увеличением избыточности сигналов [кода].

Установив общие принципы отбора кодовых комбинаций, обнаруживающих ошибки, перейдем к их приложению применительно к число-импульсным, время-импульсным, время-интервальным, время-импульсно-интервальным, амплитудно-импульсным, полярно-импульсным и частотно-импульсным кодам.

а) Принципы отбора кодовых комбинаций, обнаруживающих ошибки в избирательных системах с число-импульсными, время-импульсными, время-интервальными и амплитудно-импульсными кодами

Для отбора кодовых комбинаций, обнаруживающих одну ошибку, необходимо к кодовым элементам, используемым при формировании обычного кода, добавить один кодовый элемент. Число комбинаций в этом случае может быть определено по известной [6] формуле

$$M = 2^{S_t - 1}, \quad (1)$$

где S_t — полное число элементов, включая и дополнительный.

Из приведенной формулы видно, что из общего возможного числа комбинаций

$$2^{S_t} = \sum_{s'_{tn}=0}^{s'_{tn}=S_t} \binom{S_t}{s'_{tn}},$$

используется только половина комбинаций

$$2^{S_t-1} = \binom{S_t}{0} + \binom{S_t}{2} + \binom{S_t}{4} + \dots$$

например, все четные сочетания; тогда вторая половина из нечетных сочетаний

$$2^{S_t-1} = \binom{S_t}{1} + \binom{S_t}{3} + \binom{S_t}{5} + \dots$$

образует запрещенные комбинации.

Вышеизложенное показывает, что любая одиночная ошибка в рабочей комбинации превращает ее в запрещенную и таким образом имеется возможность обнаружить ошибку. Часто в избирательных системах используются кодовые комбинации на одно сочетание

$$M = \begin{pmatrix} S_t \\ S_{tn} \end{pmatrix},$$

которые дают возможность обнаружить несколько однотипных ошибок. Так, кодовые комбинации на одно сочетание дают возможность обнаружить $S_t - S_{tn}$ ошибок при появлении дополнительных элементов и S_{tn} ошибок при уничтожении избирающих элементов в коде. Ясно, что двойную ошибку, вызванную появлением одного дополнительного элемента с одновременным подавлением одного избирающего элемента, код, использующий комбинации на одно сочетание, не обнаруживает.

б) Принципы отбора кодовых комбинаций, обнаруживающих ошибки в избирательных системах с время-импульсно-интервальным кодом

Особенностью время-импульсно-интервального кода является возможность преобразования, под воздействием одиночного импульса помехи, двух связанных элементов короткого импульса и удлиненного интервала в удлиненный импульс и короткий интервал, или при уничтожении помехой части удлиненного импульса преобразование удлиненного импульса и короткого интервала в короткий импульс и в удлиненный интервал.

Используя формулу (1) и учитывая вышеизложенное, выражение для числа кодовых комбинаций, обнаруживающих одиночную ошибку для время-импульсно-интервального кода, может быть написано в следующем виде:

$$M = 2^i 2^{n-1} \quad (2)$$

или

$$M = 2^{i-1} 2^n. \quad (3)$$

Используя кодовые комбинации, определяемые формулами (2) или (3), можно обнаружить ошибку, вызванную воздействием одиночного импульса помехи и приводящую к двойному преобразованию кодовых элементов в время-импульсно-интервальном коде.

В избирательных системах, получивших применение в телемеханике, часто используются кодовые комбинации на одно сочетание с раздельным комбинированием импульсов и интервалов, которые дают возможность обнаружить несколько однотипных искажений.

Формула числа комбинаций, обнаруживающих несколько однотипных ошибок, имеет следующий вид:

$$M = \binom{i}{i_n} \binom{p}{p_n}. \quad (4)$$

Используя кодовые комбинации, определяемые формулой (4), можно обнаружить $i - i_n$ ошибок, вызванных удлинением импульсов и i_n ошибок, вызванных укорочением удлинённых импульсов под воздействием помехи. Ясно, что двойную ошибку, при которой число избирающих импульсов и интервалов не искажается, рассматриваемая разновидность время-импульсно-интервального кода обнаружить не может.

в) Принципы отбора кодовых комбинаций, обнаруживающих ошибки в избирательных системах с полярно-импульсными кодами

Отличительная особенность отбора кодовых комбинаций, обнаруживающих одну ошибку в избирательных системах с шаговой синхронизацией, использующих полярные импульсные признаки, состоит в том, что из общего возможного числа комбинаций, равного:

$$M = (2_n + 1_0)^{S_t} = \binom{S_t}{0} 2_n^0 + \binom{S_t}{1} 2_n^1 + \binom{S_t}{2} 2_n^2 + \dots + \binom{S_t}{S_t} 2_n^{S_t}, \quad (5)$$

где $2_n + 1_0$ — сумма двух токовых импульсных признаков и нулевого импульсного признака, могут быть применены только такие кодовые комбинации, которые используют два токовых импульсных признака. В данном случае этому требованию отвечает только последний член в формуле (5) и число рабочих комбинаций определится:

$$M = 2_n^{S_t}. \quad (6)$$

Используя устанавливаемые формулой (6) кодовые комбинации, можно обнаружить одиночную ошибку, связанную с уничтожением помехой одного из кодовых элементов, так как в системах рассматриваемого типа это приводит к искажению общего числа элементов кода, которое обнаруживается соответствующей схемой. Таким образом, применение второго токового импульсного признака в полярно-импульсных кодах равноценно добавлению дополнительного кодового элемента для обнаружения ошибки.

г) Принципы отбора кодовых комбинаций, обнаруживающих ошибки в избирательных системах с частотно-импульсными кодами

Отбор кодовых комбинаций, обнаруживающих одну ошибку при использовании частотно-импульсных кодов в избирательных системах

с шаговой синхронизацией, должен быть произведен из возможного числа комбинаций, которые определяются следующей общей формулой:

$$M = (K_f + 1_0)^{S_t} = \binom{S_t}{0} K_f^0 + \binom{S_t}{1} K_f^1 + \binom{S_t}{2} K_f^2 + \dots + \binom{S_t}{S_t} K_f^{S_t}, \quad (7)$$

где $K_f + 1_0$ — сумма K_f токовых импульсных признаков и одного нулевого импульсного признака.

Так как в избирательных системах с шаговой синхронизацией (каждый элемент кода обязательно несет функцию синхронизации) могут быть применены кодовые комбинации, составленные только из сочетаний токовых импульсных признаков, поэтому число рабочих комбинаций определится последним членом из выражения (7)

$$M = K_f^{S_t}. \quad (8)$$

Используя кодовые комбинации, определяемые формулой (8), можно обнаружить одиночную ошибку.

В некоторых избирательных системах с шаговой синхронизацией, для уменьшения времени передачи, идут на дальнейшее уменьшение числа кодовых комбинаций [7]. Это дает возможность образовать частотно-импульсные коды со сменой импульсных признаков, у которых длительность интервала мала по сравнению с длительностью рабочих импульсов. Данный вид частотно-импульсного кода также дает возможность обнаружить одиночную ошибку, а число рабочих кодовых комбинаций, для рассматриваемого кода, может быть определено по формуле

$$M = K_f (K_f - 1)^{S_t - 1}. \quad (9)$$

Рассмотрение принципов отбора кодовых комбинаций, обнаруживающих ошибки у различных избирательных систем с шаговой синхронизацией, показывает, что эти свойства кодов могут быть получены применением дополнительных кодовых элементов или токовых импульсных признаков. Таким образом, данный принцип обеспечения пассивной помехоустойчивости в избирательных системах с шаговой синхронизацией связан с обязательным увеличением избыточности кода.

Конкретное применение защиты, основанной на использовании кодовых комбинаций, обнаруживающих ошибки, получило распространение в системах телеуправления РВК [1], КРВ [4], КРП [2] и др.

6. Защита, обнаруживающая искажение числа избирающих элементов кода

Защита, обнаруживающая искажение числа избирающих элементов кода, может быть применена в избирательных системах с шаговой синхронизацией при использовании число-импульсных, время-импульсных, время-интервальных, время-импульсно-интервальных,

амплитудно-импульсных, полярно-импульсных и частотно-импульсных кодов.

Искажение числа избирающих элементов кода может быть обнаружено различными путями. Наиболее часто используемые методы обнаружения искажения правильного числа избирающих элементов кода следующие:

а) Применение счетных схем для обнаружения искажения числа избирающих элементов кода

Этот метод обнаружения искажений числа избирающих элементов состоит в использовании специальных счетных схем для проверки правильности принимаемого кода. Счетные схемы, проверяющие правильность числа избирающих элементов, дают возможность обнаружить как недостачу, так и избыток числа избирающих элементов кода и могут быть применены в системах телеуправления и телесигнализации, использующих различные принципы избирания. В частности, рассмотренный метод защиты получил применение в системах телеуправления ВРТ [2, 5].

б) Применение пирамидальных декомбинаторных схем с защитными цепями, обнаруживающими искажение числа избирающих элементов кода

Структурная схема одного из декомбинаторов с защитными цепями, обнаруживающими искажения числа избирающих элементов, приведена на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что цепь исполнения каждого принимаемого сообщения составляется через заданное число элементов схемы совпадения и несовпадения. Например, исполнение первого данного происходит через три элемента схемы совпадения (РИ, 1П и 2П) и два элемента схемы несовпадения (3П и 4П). Нарушение заданного условия составления цепи для исполнения принимаемого сообщения приводит к защитному отказу. Данная разновидность схемы обнаружения искажения числа избирающих элементов кода получила применение в системах, использующих комбинационные принципы избирания. Конкретно этот принцип защиты применен в системах телеуправления РВК, КРВ, КРП, СК-1 и др.

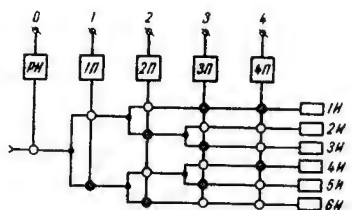


Рис. 3. Структурная схема декомбинатора с защитными цепями

в) Применение пирамидальных или прямоугольных декомбинаторов со схемой защиты, обнаруживающей искажение числа избирающих элементов по току или напряжению

Структурные схемы пирамидальных и прямоугольных декомбинаторов, обнаруживающих искажение числа избирающих элементов по току или напряжению, приведены на рис. 4.

Из рис. 4 и 5 видно, что пирамидальная и прямоугольная декомбинаторные схемы составляют цепи для выявления принятого сообщения только с помощью элементов схемы совпадения (схемы несовпадений отсутствуют), которые дают возможность обнаружить только уменьшение числа избирающих элементов кода и исключить неправильную работу схем при подобном нарушении. При увеличении числа избирающих элементов в декомбинаторных схемах этого типа приводится в действие защитный элемент, который срабатывает под действием избыточного напряжения или тока, снимаемого с устройств, запоминающих принятые кодовые элементы. Защитный элемент $З$ при искажении числа избирающих элементов кода срабатывает и приводит устройства, запоминающие кодовые элементы, в исходное состояние, исключая неправильную работу схемы.

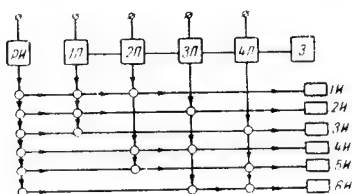


Рис. 4. Структурная схема пирамидального декомбинатора с защитой, обнаруживающей искажение числа избирающих элементов по току или напряжению

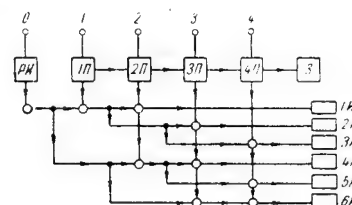


Рис. 5. Структурная схема прямоугольного декомбинатора с защитой, обнаруживающей искажение числа избирающих элементов по току или напряжению

Конкретное применение декомбинатор с защитой по току получило в последнем варианте системы телеуправления КРВ, разработанной в 1941 г.

Как правило, в современных системах телеуправления и телесигнализации используются одновременно все допустимые методы обеспечения пассивной помехоустойчивости для принятой структуры кода. Такое комплексное использование различных методов обеспечения пассивной помехоустойчивости дает возможность обнаружить наибольшее число ошибок, вызванных воздействием помехи.

Б. Параметрические коды, обнаруживающие одну или несколько ошибок при комплексном использовании различных методов обеспечения пассивной помехоустойчивости

При комплексном использовании различных методов обеспечения пассивной помехоустойчивости в избирательных системах с шаговой синхронизацией можно формировать различные параметрические коды, обнаруживающие одну или несколько ошибок.

На рис. 6 приведены различные типы параметрических кодов, на которые воздействуют случайные импульсы помехи различного знака, причем кодовые импульсы показаны заштрихованными, а импульсы помехи — сплошными черными импульсами.

Перейдем к рассмотрению свойств различных параметрических кодов по обнаружению ошибок при воздействии случайной импульсной помехи.

На рис. 6 приведен число-импульсный код, использующий в качестве импульсного признака два числовых кода с четным числом импульсов, которые дают возможность обнаружить как одиночную, так и двойную ошибку в коде, где $M = 2^{S_t}$ (S_t равно числу рабочих элементов), и обеспечить защитный отказ.

При воздействии одиночного импульса помехи будет иметь место искажение общего числа элементов кода, которое обнаруживается соответствующей схемой, и неправильная работа схемы будет исключена. Воздействие двух импульсов помехи могут вызвать:

- 1) уничтожение импульса в одной рабочей серии и появление дополнительного импульса в другой рабочей серии;
- 2) уничтожение двух импульсов в одной из рабочих серий;
- 3) появление двух дополнительных импульсов в одной из рабочих серий.

Все перечисленные выше искажения обнаруживаются схемой, проверяющей число импульсов в рабочей серии или схемой, контролирующей временный промежуток между рабочими сериями.

Применение кодовых комбинаций, обнаруживающих одну ошибку 2^{S_t-1} в избирательных системах с число-импульсным кодом, дает возможность обнаружить до четырех ошибок, вызванных воздействием помехи.

На рис. 6, б приведен время-интервальный код, который при воздействии одиночных импульсов помехи обнаруживает искажение как при появлении дополнительных элементов, так и при уничтожении отдельных элементов кода. При попадании на базу передаваемого кода двух импульсов помехи разного знака может иметь место уничтожение одного рабочего импульса и появление нового импульса на одной из свободных временных позиций. Эти ошибки могут быть обнаружены использованием кодовых комбинаций, отличающихся на

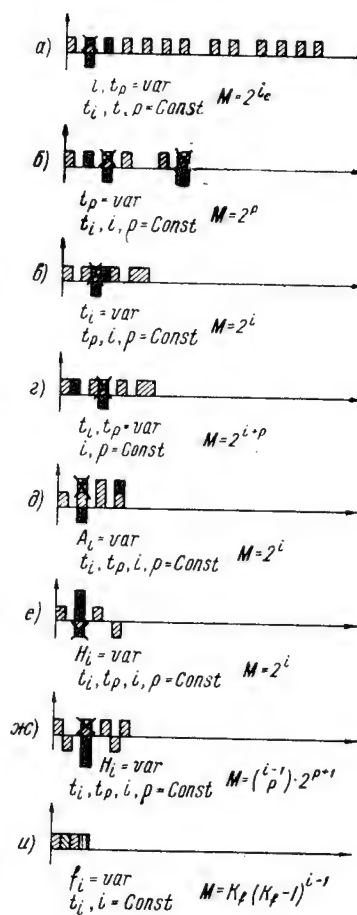


Рис. 6. Параметрические коды, подвергающиеся воздействию одиночных импульсов помехи

три перехода или применением защиты от искажения время-интервального импульсного признака в замкнутых линейных цепях, например, проводных линиях связи.

Число кодовых комбинаций, отличающихся на три перехода и способных обнаружить две ошибки, можно определить по формуле [6]

$$M \leq \frac{2^p}{p+1}, \quad (9)$$

где p — число интервалов в коде.

Применение кодовых комбинаций с двумя или тремя переходами, обнаруживающими одну или две ошибки во время-интервальном коде, может быть оправдано желанием обнаружить ошибки, вызываемые ненадежностью действия отдельных элементов избирательной системы.

На рис. 6, в приведен время-импульсный код, который при воздействии одиночных импульсов помехи обнаруживает искажение как при появлении дополнительных элементов в коде, так и при уничтожении части удлиненного элемента или отдельных элементов кода. Появление дополнительных элементов или уничтожение отдельных элементов обнаруживается схемой защиты от искажения общего числа элементов кода, а уничтожение части удлиненных импульсов обнаруживается применением схемы защиты от искажения временных параметров кода или использованием кодовых комбинаций, обнаруживающих одну ошибку.

При возникновении под воздействием помехи двойной ошибки — подавления части удлиненного импульса и удлинения соседнего короткого импульса — может иметь место преобразование одного передаваемого данного в другое. Это может быть обнаружено или использованием кодовых комбинаций, отличающихся на три перехода, или в замкнутых линейных системах, например, проводных линиях связи применением защиты от искажения импульсного признака кода.

На рис. 6, г приведен время-импульсно-интервальный код, который при воздействии одиночных импульсов помехи обнаруживает ошибки, обусловленные появлением дополнительных элементов в коде и уничтожением части удлиненного элемента или отдельного элемента в коде. При использовании кодовых комбинаций с двумя переходами [формулы (2), (3) и (4)] во время-импульсно-интервальном коде можно обнаружить вызываемое одним импульсом помехи двойное искажение, возникающее при удлинении короткого импульса и укорочении соседнего удлиненного интервала, или при уничтожении части удлиненного импульса и удлинении соседнего короткого интервала. Ошибки, вызываемые воздействием двух и более импульсов помехи, могут быть обнаружены использованием кодовых комбинаций, отличающихся на три и более переходов или применением защиты от искажения временных импульсных признаков в замкнутых линейных цепях, например, проводных линиях связи.

На рис. 6, д приведен амплитудно-импульсный код, который при воздействии одиночных импульсов помехи обнаруживает ошибки,

вызванные появлением дополнительных элементов, уничтожением отдельного элемента и искажением амплитудного импульсного признака в коде. Все перечисленные ошибки обнаруживаются с помощью схемы защиты от искажения общего числа элементов, схем и защиты от искажения временных параметров кода и схемы защиты от искажения импульсных признаков кода. Одиночные искажения импульсных признаков кода могут быть обнаружены применением кодовых комбинаций, отличающихся на два перехода.

Появление большего числа искажений амплитудных импульсных признаков может быть обнаружено применением кодовых комбинаций, отличающихся на три и более переходов, или в замкнутых линейных системах, например, проводных линиях связи с использованием защиты от искажения импульсных признаков кода.

На рис. 6, *е* и 6, *ж* приведены две разновидности полярно-импульсного кода, который при воздействии одиночных импульсов помехи обнаруживает ошибки, вызванные появлением дополнительных элементов, уничтожением отдельного элемента и искажением полярно-импульсного признака.

Все перечисленные ошибки в избирательных системах с полярно-импульсным кодом обнаруживаются с помощью защиты от искажения общего числа элементов кода, от искажения временных параметров кода и от искажения полярно-импульсных признаков кода. Применение кодов с большим числом переходов между кодовыми комбинациями нецелесообразно, так как данный тип кода может быть применен только по проводным линиям связи, которые дают возможность обнаружить большое число ошибок с помощью схемы защиты от искажения полярного импульсного признака кода, в сочетании с другими защитными схемами.

На рис. 6, *и* приведена одна разновидность частотно-импульсного кода, которая при воздействии одиночных импульсов помехи переменного тока с частотой, соответствующей частоте рабочих импульсов, обнаруживает ошибку, вызванную появлением дополнительных элементов, уничтожением отдельного элемента и искажением частотного импульсного признака. Все рассмотренные ошибки в избирательных системах с частотно-импульсным кодом обнаруживаются с помощью схем защиты от искажения общего числа элементов кода и схемой защиты от искажения импульсных признаков кода. Применение защиты от искажения импульсных признаков в замкнутых линейных системах, например, двухсторонняя система связи по высокочастотным постам, используемая в системе СК, дает возможность обнаружить и большое число ошибок, поэтому употребление кодов с большим числом переходов может быть оправдано только на разомкнутых линейных схемах одностороннего действия.

Как видно из вышеизложенного, параметрические коды при комплексном использовании различных методов обеспечения пассивной помехоустойчивости дают возможность обнаружить одну и несколько ошибок, вызываемых воздействием случайной помехи.

Из рассмотрения свойств параметрических кодов также ясно, что эта группа кодов может обеспечить надежную передачу данных либо при отсутствии помех, либо при редком попадании импульсов помехи на базу передаваемого кода и при обязательном повторении каждого передаваемого кода несколько раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. К. Ш у к и н, Основы техники телеуправления, Госэнергоиздат, 1945.
2. В. С. М а л о в, Телемеханика в энергетических системах, Госэнергоиздат, 1951.
3. M. E. R e a g a n, Самоконтролирующаяся система телеуправления, Electrical Engineering, Oktober, 1938.
4. А. А. Г о р я и н о в и Р. Л. Р а й н е с, Телеуправление, Госэнергоиздат, 1954.
5. Коды с обнаружением и исправлением ошибок, Сборник статей под редакцией А. М. Петровского, Изд. иностр. литер. 1956.

Поступила в марте 1957 г.

Канд. техн. наук, доц. В. И. АНИСИМОВ

ПЕРЕХОДНЫЕ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С РЕОСТАТНО- ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ

Фазочувствительные выпрямители широко применяются в различных схемах автоматического управления и регулирования и в измерительной технике для преобразования напряжения переменного тока в постоянное напряжение, величина и полярность которого зависят от фазового сдвига между сигналом, поданным на вход схемы, и некоторым опорным напряжением. Наиболее часто фазочувствительные выпрямители работают в режиме, когда фазовый сдвиг между входным и опорным напряжениями равен нулю или 180° . Для уменьшения пульсации выходного напряжения нагрузка фазочувствительного выпрямителя, как правило, шунтируется емкостью, что приводит к увеличению времени установления выходного напряжения при включении сигнала на вход фазочувствительного выпрямителя.

Если на вход выпрямителя подано модулированное напряжение, амплитуда которого изменяется по синусоидальному закону, то наличие емкости на выходе схемы вызывает амплитудно-частотные и фазо-частотные искажения, наличие которых часто является недопустимым. При определенных соотношениях между параметрами схемы и амплитудой напряжений, подведенных к выпрямителю, в этом случае могут появиться также и нелинейные искажения выходного напряжения.

Установившиеся режимы фазочувствительных выпрямителей с реостатно-емкостной нагрузкой рассмотрены в работах [1, 2].

Настоящая работа посвящена исследованию переходных и частотных характеристик в дифференциальных мостовых схемах фазочувствительных выпрямителей с вентилями и реостатно-емкостной нагрузкой.

На рис. 1 и 2 приведены однополупериодная и двухполупериодная дифференциальные мостовые схемы фазочувствительных выпрямителей. В общем случае последовательно с вентилями может быть

включено добавочное сопротивление r_d с целью повышения стабильности работы схемы при изменении параметров вентилей.

При исследовании переходных процессов в приведенных схемах сделаем следующие допущения:

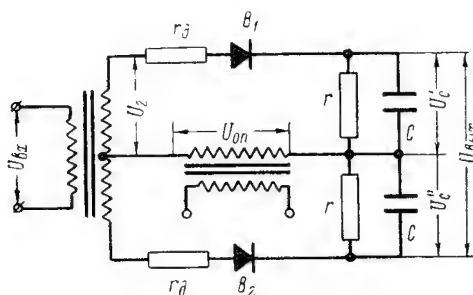


Рис. 1. Однополупериодная дифференциальная мостовая схема фазочувствительного выпрямителя

1. Внутреннее сопротивление вентиля в прямом направлении постоянно и равно r_i , обратное сопротивление вентиля равно бесконечности.

2. Активные сопротивления и индуктивности рассеяния обмоток трансформатора настолько малы, что влиянием их можно пренебречь.

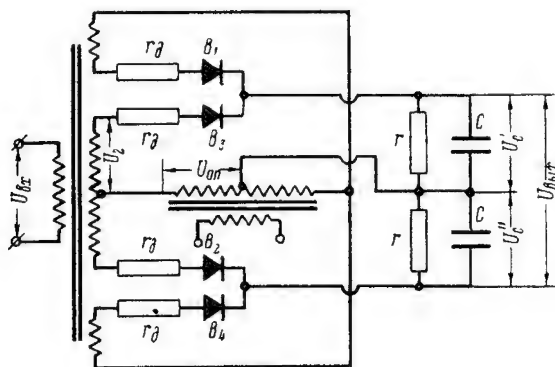


Рис. 2. Двухполупериодная дифференциальная мостовая схема фазочувствительного выпрямителя

3. На выходе схемы включены конденсаторы достаточно большой емкости, поэтому в установившемся режиме можно считать выходное напряжение постоянным.

4. В переходном режиме амплитудные значения переменных напряжений и токов, а также постоянные составляющие выпрямлен-

ных напряжений и токов изменяются в течение периода несущей частоты незначительно, так что можно считать эти величины медленно меняющимися функциями времени.

5. Фазовый сдвиг между опорным напряжением и напряжением u_2 на вторичной обмотке входного трансформатора равен нулю или 180° и всегда выполняется условие $U_{on\ max} > U_{2\ max}$, необходимое для нормальной работы фазочувствительного выпрямителя.

Учитывая сделанные допущения и полагая для определенности, что переменные напряжения, приложенные к нечетным вентилям B_1 и B_3 , находятся в фазе, а напряжения, приложенные к четным вентилям B_2 и B_4 , — в противофазе, определим средние значения токов, протекающих через вентили за период несущей частоты.

Мгновенные значения токов через нечетные вентили i'_B и через четные вентили i''_B определяются выражениями:

$$i'_B = \frac{u_{on} + u_2 - U'_c(t)}{r_B} = \frac{[U_{on\ max} + U_{2\ max}(t)] \cos \omega t - U'_c(t)}{r_B};$$

$$i''_B = \frac{u_{on} - u_2 - U''_c(t)}{r_B} = \frac{[U_{on\ max} - U_{2\ max}(t)] \cos \omega t - U''_c(t)}{r_B},$$

где:

$r_B = r_i + r_\phi$ — сопротивление цепи вентиля;

$U'_c(t)$ и $U''_c(t)$ — напряжения на верхнем и нижнем конденсаторах.

В соответствии с принятыми допущениями, $U'_c(t)$, $U''_c(t)$ и $U_{2\ max}(t)$ являются медленно меняющимися функциями времени при $t > 0$.

В моменты времени, когда выполняются условия

$$[U_{on\ max} + U_{2\ max}(t)] \cos \omega t - U'_c(t) = 0,$$

$$[U_{on\ max} - U_{2\ max}(t)] \cos \omega t - U''_c(t) = 0,$$

токи через вентили прекращаются и при этом углы отсечки θ_1 и θ_2 определяются выражениями:

$$\cos \theta_1 = \frac{U'_c(t)}{U_{on\ max} + U_{2\ max}(t)}; \quad (1)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{U''_c(t)}{U_{on\ max} - U_{2\ max}(t)}. \quad (2)$$

Так как значения $U'_c(t)$, $U''_c(t)$ и $U_{2\ max}(t)$ являются медленно меняющимися функциями времени, то усредняя токи через вентили

за период изменения этих токов, получим:

$$\begin{aligned} I'_B(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\theta_1}^{+\theta_1} \frac{[U_{on. max} + U_{2 max}(t)] \cos \omega t - U'_c(t)}{r_B} d\omega t = \\ &= \frac{1}{\pi r_B} \{ [U_{on. max} + U_{2 max}(t)] \sin \theta_1 - \theta_1 U'_c(t) \}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I''_B(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\theta_2}^{+\theta_2} \frac{[U_{on. max} - U_{2 max}(t)] \cos \omega t - U''_c(t)}{r_B} d\omega t = \\ &= \frac{1}{\pi r_B} \{ [U_{on. max} - U_{2 max}(t)] \sin \theta_2 - \theta_2 U''_c(t) \}. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя в выражения (4) и (5) значение

$$U_{вх. max}(t) = \frac{U_{2 max}(t)}{n},$$

где n — коэффициент трансформации входного трансформатора, и учитывая уравнения (1) и (2), получим окончательно:

$$I'_B(t) = \frac{1}{\pi r_B} [U_{on. max} + nU_{вх. max}(t)] (\sin \theta_1 - \theta_1 \cos \theta_1); \quad (5)$$

$$I''_B(t) = \frac{1}{\pi r_B} [U_{on. max} - nU_{вх. max}(t)] (\sin \theta_2 - \theta_2 \cos \theta_2). \quad (6)$$

Поскольку пульсации напряжения на конденсаторах малы, можем записать следующие уравнения:

$$C \frac{dU'_c(t)}{dt} + \frac{U'_c(t)}{r} = mI'_B(t),$$

$$C \frac{dU''_c(t)}{dt} + \frac{U''_c(t)}{r} = mI''_B(t),$$

где

$m = 1$ для однополупериодной схемы,

$m = 2$ для двухполупериодной схемы.

Или, подставляя значения токов I'_B и I''_B :

$$T \frac{dU'_c(t)}{dt} + U'_c(t) = \frac{1}{\pi \alpha} [U_{on. max} + nU_{вх. max}] (\sin \theta_1 - \theta_1 \cos \theta_1), \quad (7)$$

$$T \frac{dU''_c(t)}{dt} + U''_c(t) = \frac{1}{\pi \alpha} [U_{on. max} - nU_{вх. max}] (\sin \theta_2 - \theta_2 \cos \theta_2), \quad (8)$$

где:

$$T = rC, \quad \alpha = \frac{r_B}{mr}.$$

Уравнения (7) и (8) справедливы только в том случае, если средние значения токов через вентили за период несущей частоты не равны нулю, т. е. если выполняются условия:

$$U'_c(t) < U_{on, max} + nU_{вх. max}(t); \quad (9)$$

$$U''_c(t) < U_{on, max} - nU_{вх. max}(t). \quad (10)$$

Очевидно, что для рассматриваемых схем одно из приведенных неравенств всегда будет выполняться.

Если неравенство (9) (или 10) в течение какого-то интервала времени не выполняется, то среднее значение тока через четные (или нечетные) вентили равно нулю и напряжение на конденсаторе U'_c (или U''_c) определяется для этого интервала времени уравнением:

$$T \frac{dU'_c(t)}{dt} + U'_c(t) = 0, \quad (11)$$

или

$$T \frac{dU''_c(t)}{dt} + U''_c(t) = 0. \quad (12)$$

При постоянной амплитуде входного напряжения для установившегося режима уравнения (7) и (8) приводятся к виду:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_{1y} - \theta_{1y} &= \pi\alpha, \\ \operatorname{tg} \theta_{2y} - \theta_{2y} &= \pi\alpha, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

откуда следует, что в установившемся режиме $\theta_{1y} = \theta_{2y}$. Так как в этом случае напряжение на конденсаторах:

$$U'_{cy} = (U_{on, max} + nU_{вх. max}) \cos \theta_y,$$

$$U''_{cy} = (U_{on, max} - nU_{вх. max}) \cos \theta_y,$$

то в установившемся режиме выходное напряжение определяется выражением

$$U_{вых. y} = U'_{cy} - U''_{cy} = 2n \cos \theta_y U_{вх. max}. \quad (14)$$

Значение $\cos \theta_y$ может быть определено по графику, приведенному на рис. 3.

Переходная характеристика фазочувствительного выпрямителя, в случае если выполняются условия (9) и (10), определяется решением уравнений (7) и (8). Для интервала времени, в течение которого неравенство (9) или (10) не выполняется, изменение напряжения на конденсаторе определяется решением уравнения (11) или (12).

Решение уравнений (7) и (8) может быть осуществлено только путем численного или графического интегрирования этих уравнений.

Естественно, что такой способ является неудобным для практического использования и поэтому целесообразно несколько упростить выражения, определяющие средние значения токов через вентили с тем, чтобы можно было получить решение, хотя и с меньшей точностью, но в общем виде.

Для этой цели удобно воспользоваться общепринятой кусочно-линейной аппроксимацией функции $\psi = \sin \theta - \theta \cos \theta$, выбрав в качестве независимой переменной $\cos \theta$ [3, 4]. Аппроксимация функции ψ двумя прямыми дает незначительную погрешность, но приводит

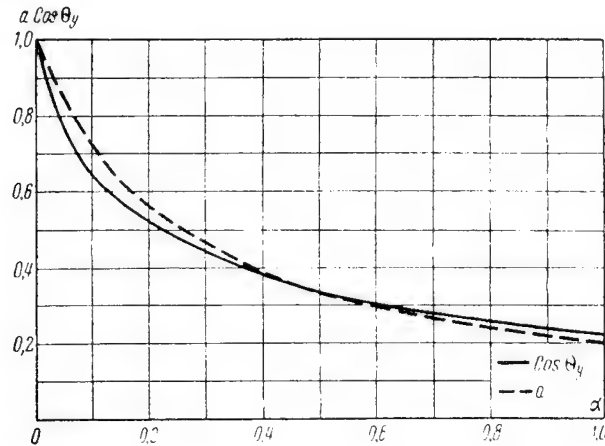


Рис. 3. Кривые $\cos \theta_y = f(\alpha)$ и $a = f(\alpha)$

к необходимости сопряжения решений. Аппроксимация одной прямой обеспечивает несколько меньшую точность, но позволяет избежать сопряжения решений.

Поскольку необходимость сопряжения решений существенно усложняет практическое использование результатов анализа, аппроксимируем функцию $\psi = \sin \theta - \theta \cos \theta$ прямой $\psi = A - B \cos \theta$ при значениях коэффициентов $A = B = 0,8$ [3, 4]. Тогда уравнения (7) и (8) можно записать в следующем виде:

$$T \frac{dU'_c(t)}{dt} + U'_c(t) = \frac{1}{\pi\alpha} [U_{on, max} + nU_{вх, max}(t)] (A - B \cos \theta_1);$$

$$T \frac{dU''_c(t)}{dt} + U''_c(t) = \frac{1}{\pi\alpha} [U_{on, max} - nU_{вх, max}(t)] (A - B \cos \theta_2).$$

Учитывая выражения (1) и (2), окончательно получим:

$$T_s \frac{dU'_c(t)}{dt} + U'_c(t) = a [U_{on, max} + nU_{вх, max}(t)], \quad (15)$$

$$T_s \frac{dU''_c(t)}{dt} + U''_c(t) = a [U_{on, max} - nU_{вх, max}(t)], \quad (16)$$

где:

$$a = \frac{\theta}{\pi\alpha + B} = \frac{0,255}{\alpha + 0,255};$$

$$T_a = \frac{\pi\alpha}{\pi\alpha + B} T = \frac{\alpha}{\alpha + 0,255} T.$$

Если выполняются условия (9) и (10), то уравнение, определяющее изменение выходного напряжения, можно получить вычитая из уравнения (16) уравнение (16):

$$T_a \frac{dU_{вых}(t)}{dt} + U_{вых}(t) = 2naU_{вх. max}(t). \quad (17)$$

В соответствии с уравнением (17), установившееся значение выходного напряжения при включении входного сигнала с постоянной амплитудой определяется выражением:

$$U_{вых. y} = 2naU_{вх. max}. \quad (18)$$

На рис. 3 нанесена пунктирной линией зависимость $a = f(\alpha)$. Сравнение кривой $a = f(\alpha)$ с кривой $\cos \theta_y = f(\alpha)$ показывает, что ошибка в определении установившегося значения выходного напряжения по приближенной формуле (18) не превышает 8%, что вполне допустимо для технического расчета схемы.

Используя уравнение (17), можно легко рассчитать переходные процессы в схемах фазочувствительных выпрямителей при любой форме изменения амплитуды входного сигнала. При этом необходимо, естественно, проверять, выполняются ли неравенства (9) и (10).

В случае включения сигнала с постоянной амплитудой неравенства (9) и (10) могут быть приведены к виду, более удобному для практического использования:

$$M = \frac{nU_{вх. max}}{U_{оп. max}} < 1 - a = \frac{\alpha}{\alpha + 0,255}. \quad (19)$$

Если неравенство (19) выполняется, то выходное напряжение определяется решением уравнения (17):

$$U_{вых}(t) = 2na \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right) U_{вх. max}.$$

На рис. 4 приведены кривые изменения напряжения на выходе фазочувствительного выпрямителя при включении сигнала с постоянной амплитудой, построенные путем решения уравнения (17) (кривая 1) и путем графического интегрирования уравнений (7) и (8) (кривая 2) для значения $\alpha = 10^{-2}$. Интересно отметить, что кривые не совпадают в основном, вследствие расхождения в значениях установившихся напряжений на выходе схемы, определенных точным и приближенным способами, т. е. из-за разницы между $\cos \theta_y$ и a (см. рис. 3).

На рис. 5 приведены те же кривые, что и на рис. 4, но по оси ординат отложено не отношение выходного напряжения к входному, а отношение выходного напряжения к его установившемуся значению. При этом установившееся значение напряжения

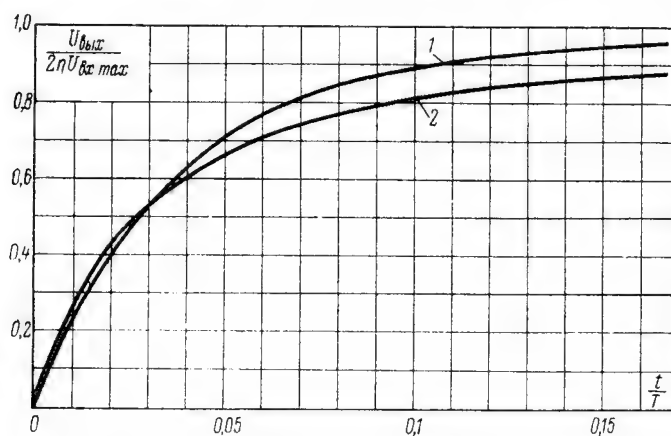


Рис. 4. Переходные характеристики фазочувствительного выпрямителя

для кривой 1 определяется уравнением (18), а для кривой 2 — выражением (14). Как следует из рис. 5, обе кривые практически

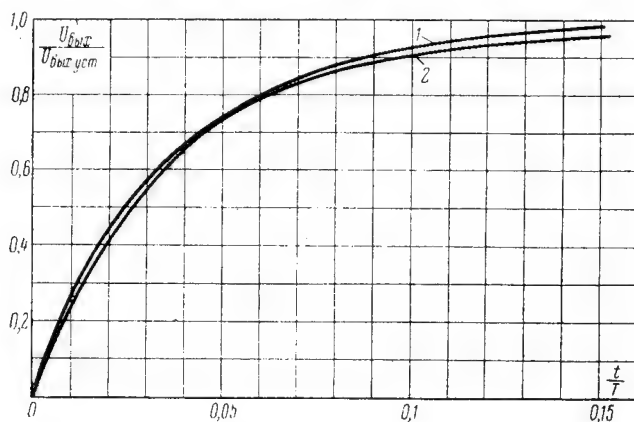


Рис. 5. Переходные характеристики фазочувствительного выпрямителя

совпадают. Поэтому, если требуется более точное построение кривой установления напряжения на входе фазочувствительного выпрямителя, то целесообразно строить ее в координатах $U_{вых} / U_{вых уст} — t$, а установившееся значение выходного напряжения определять по выражению (14) (рис. 3).

Аналогичные результаты получаются и для других реальных значений коэффициента α ($\alpha = 10^{-3} \div 1$).

Таким образом, установление напряжения на выходе фазочувствительного выпрямителя при включении входного сигнала, с постоянной амплитудой такой величины, что выполняется условие (19), протекает по закону, достаточно близкому к экспоненциальному. При этом постоянная времени схемы существенно зависит от сопротивления цепи вентиля r_B , уменьшаясь с уменьшением последнего. Так как сопротивление цепи вентиля определяется внутренним сопротивлением вентиля r_i и величиной добавочного сопротивления r_d , включаемого для повышения стабильности схемы, то требование уменьшения постоянной времени фазочувствительного выпрямителя находится в противоречии с требованием увеличения стабильности выходного напряжения при изменении параметров вентиля.

Обычно при расчете фазочувствительного выпрямителя задается величина пульсации напряжения на выходе схемы, поэтому целесообразно выразить постоянную времени выпрямителя через коэффициент пульсаций выходного напряжения в установившемся режиме.

Коэффициент пульсаций обычно определяется как отношение амплитуды основной гармоники к постоянной составляющей напряжения. Так как сопротивление конденсатора на частоте ω много меньше сопротивления нагрузки, то амплитуда основной гармоники напряжения на выходе однополупериодной схемы определится выражением:

$$U_{m. \text{вых}} = \frac{I'_{m1}}{\omega C} - \frac{I''_{m1}}{\omega C}.$$

Амплитудные значения первых гармоник токов через вентили I'_{m1} и I''_{m1} :

$$I'_{m1} = \frac{1}{\pi} \int_{-\theta_1}^{+\theta_1} i'_B \cos \omega t d\omega t = \frac{U_{on. \max} + nU_{ex. \max}}{\pi r_B} (\theta_1 - \sin \theta_1 \cos \theta_1);$$

$$I''_{m1} = \frac{1}{\pi} \int_{-\theta_2}^{+\theta_2} i''_B \cos \omega t d\omega t = \frac{U_{on. \max} + nU_{ex. \max}}{\pi r_B} (\theta_2 - \sin \theta_2 \cos \theta_2).$$

Функция $\varphi = \theta - \sin \theta \cos \theta$ с достаточной степенью точности может быть аппроксимирована прямой $\varphi = M - N \cos \theta$ [4] при значениях коэффициентов $M = N = 1,57$. Используя эту аппроксимацию и учитывая выражения (1) и (2), получим:

$$I'_{m1} = \frac{U_{on. \max} + nU_{ex. \max} - U'_c}{2r_B};$$

$$I''_{m1} = \frac{U_{on. \max} + nU_{ex. \max} - U''_c}{2r_B}.$$

Следовательно, амплитуда основной гармоники выходного напряжения:

$$\begin{aligned} U_{m. \text{ вых}} &= \frac{1}{2\omega C r_B} (2n U_{\text{вх. max}} - U_{\text{вых}}) = \\ &= \frac{1}{2\omega C r_B} \left(\frac{1}{a} - 1 \right) U_{\text{вых}} = \frac{1,96\alpha}{\omega C r_B} U_{\text{вых}}. \end{aligned}$$

Отсюда коэффициент пульсаций выходного напряжения:

$$p_{\sim} = \frac{1,96\alpha}{\omega C r_B} \approx \frac{2}{\omega T}.$$

Таким образом, выражение для постоянной времени однополупериодного фазочувствительного выпрямителя может быть представлено в следующем виде:

$$T_{\partial} = \frac{2}{\omega p_{\sim}} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + 0,255}.$$

Аналогично можно определить коэффициент пульсации и постоянную времени для двухполупериодной схемы:

$$p_{\sim} = \frac{0,8}{\omega T} \quad T_{\partial} = \frac{0,8}{\omega p_{\sim}} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + 0,255}.$$

Полученные выражения показывают, что при заданном коэффициенте пульсаций постоянная времени фазочувствительных выпрямителей может изменяться в очень широких пределах в зависимости от выбранного значения α .

Рассмотрим далее случай, когда входной сигнал имеет достаточно большую амплитуду и условие (19) не выполняется. После включения сигнала один из вентилях (например, B_2) запирается и конденсатор начинает разряжаться через сопротивление r . Напряжение на конденсаторе определяется при этом решением уравнения (12), т. е.

$$U_c'' = U_{co} e^{-\frac{t}{T}},$$

где

$$U_{co} = U_{\text{оп. max}} \cos \theta_y \approx a U_{\text{оп. max}}.$$

В момент времени

$$t_1 = T \ln \frac{U_{co}}{U_{\text{оп. max}} - n U_{\text{вх. max}}} \approx T \ln \frac{a U_{\text{оп. max}}}{U_{\text{оп. max}} - n U_{\text{вх. max}}}$$

вентиль B_2 открывается и дальнейшее изменение напряжения U_c'' определяется решением уравнения (16) при начальных условиях:

$$U_{cn}'' = U_{\text{оп. max}} - n U_{\text{вх. max}},$$

т. е.

$$U_c'' = (U_{\text{оп. max}} - n U_{\text{вх. max}}) e^{-\frac{t-t_1}{T_{\partial}}} + a (U_{\text{оп. max}} - n U_{\text{вх. max}}) \left(1 - e^{-\frac{t-t_1}{T_{\partial}}} \right).$$

Напряжение на конденсаторе U'_c в течение всего переходного процесса:

$$U'_c = aU_{on. max} + anU_{вх. max} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_d}}\right).$$

Таким образом, выходное напряжение $U_{вых}$ определяется в этом случае выражениями:

при $t < t_1$:

$$U_{вых} = a \left[U_{on. max} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + nU_{вх. max} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_d}}\right) \right],$$

при $t > t_1$:

$$U_{вых} = anU_{вх. max} \left(2 - e^{-\frac{t}{T_d}}\right) - (1 - a)(U_{on. max} - nU_{вх. max}) e^{-\frac{t-t_1}{T_d}}.$$

Отсюда следует, что при включении на вход схемы сигнала с большой амплитудой время установления выходного напряжения при малых значениях α значительно возрастает (так как $T \gg T_d$). При этом время переходного процесса существенно зависит от величины входного сигнала.

Если на вход фазочувствительного выпрямителя подан модулированный сигнал

$$u_{вх} = U_{вх. max}(t) \cos \omega t = U_{вх. max} \sin \Omega t \cos \omega t$$

и частота модуляции Ω много меньше несущей частоты ω , а амплитуда $U_{вх. max}$ невелика, так что выполняются условия (9) и (10), то напряжение на выходе схемы может быть получено решением уравнения (17).

Для установившегося режима имеем:

$$U_{вых} = \frac{2anU_{вх. max}}{\sqrt{1 + (\Omega T_d)^2}} \sin(\Omega t - \varphi),$$

где:

$$\varphi = \arctg \Omega T_d.$$

Следовательно, если выполняются условия (9) и (10), то фазочувствительный выпрямитель является линейным инерционным звеном первого порядка с эквивалентной комплексной передаточной функцией:

$$W(j\Omega) = \frac{2an}{1 + j\Omega T_d}.$$

Значение амплитуды входного сигнала, обеспечивающее выполнение условий (9) и (10), может быть определено следующим образом. При изменении амплитуды сигнала по закону:

$$U_{вх. max}(t) = U_{вх. max} \sin \Omega t$$

напряжение на конденсаторе (например, U_c) определяется решением уравнения (15), т. е.

$$U_c' = aU_{on, max} + \frac{anU_{в.р. max}}{\sqrt{1 + (\Omega T_d)^2}} \sin(\Omega t - \varphi),$$

где

$$\varphi = \text{arctg } \Omega T_d.$$

Это решение справедливо лишь при выполнении в любой момент времени условия (9), т. е.:

$$U_c' < U_{on, max} + nU_{в.р. max} \sin \Omega t.$$

Подставляя значение U_c' получим:

$$aU_{on, max} + \frac{anU_{в.р. max}}{\sqrt{1 + (\Omega T_d)^2}} \sin(\Omega t - \varphi) < U_{on, max} + nU_{в.р. max}.$$

Последнее неравенство после несложных преобразований может быть приведено к следующему виду:

$$M = \frac{nU_{в.р. max}}{U_{on, max}} < \frac{1 - a}{\sqrt{1 - \frac{a(2 - a)}{1 + (\Omega T_d)^2}}}. \quad (20)$$

Если это неравенство не выполняется, то форма напряжения на выходе фазочувствительного выпрямителя не будет соответствовать форме огибающей входного сигнала, т. е. фазочувствительный выпрямитель будет вносить нелинейные искажения сигнала.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что при достаточно малом значении амплитуды входного сигнала переходные процессы в дифференциальных мостовых схемах фазочувствительных выпрямителей с реостатно-емкостной нагрузкой могут быть описаны линейным дифференциальным уравнением первого порядка и, следовательно, выпрямитель является линейным аperiodическим звеном. Постоянная времени этого звена существенно зависит от соотношения между сопротивлением нагрузки и сопротивлением цепи вентиля. При заданном значении коэффициента пульсаций выходного напряжения постоянная времени фазочувствительного выпрямителя может изменяться в очень широких пределах в зависимости от выбранного значения α , при этом требование уменьшения постоянной времени находится в противоречии с требованием повышения стабильности схемы. При больших сигналах время установления выходного напряжения значительно увеличивается и в сильной степени зависит от амплитуды сигнала. Если на вход фазочувствительного выпрямителя подается модулированный сигнал, то при достаточно большой амплитуде последнего, появляются нелинейные искажения выходного напряжения. Параметры схемы, обеспечивающие отсутствие нелинейных искажений, определяются при этом неравенством (20).

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Попов, Теория кольцевого детектора при работе на активную нагрузку, зашунтированную емкостью, „Автоматика и телемеханика“, № 1, 1955.
2. Е. М. Решетников, Теория и расчет фазочувствительных усилителей — выпрямителей, Оборонгиз, 1956.
3. А. А. Куликовский, Процессы установления при детектировании импульсных сигналов, „Радиотехника“, № 6, 1955.
4. Е. Л. Геренрот, Детектирование импульсов сложной формы, „Радиотехника и электроника“, № 4, 1956.

Поступила в марте 1957 г.

Канд. техн. наук, доц. В. Б. СМОЛОВ
Ассистент Н. А. СМЕРНОВ

РАСЧЕТ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИНТЕГРАТОРА И НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

В современных электромеханических счетно-решающих приборах и приборах автоматического управления в качестве интегрирующих устройств часто используется электромеханическая цепочка (рис. 1), носящая название электромеханического интегратора.

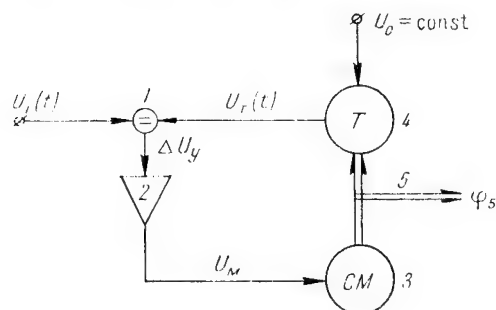


Рис. 1.

Электромеханический интегратор состоит из компенсационного узла 1, вырабатывающего разность

$$\Delta U_y = U_1(t) - U_T(t), \quad (1)$$

моторного усилителя 2 с коэффициентом усиления k , следящего двигателя 3 и

тахометра 4, выходное напряжение которого U_T непрерывно сравнивается с интегрируемым напряжением U_1 .

Закон движения выходного валика 5 устройства, при соблюдении ряда условий, может быть с достаточной для практики степенью точности описан уравнением вида

$$\varphi_5 = K_\varphi \int_0^t U_1(t) \cdot dt. \quad (2)$$

Теоретическая оценка эксплуатационной точности работы электромеханического интегратора и некоторых способов ее увеличения составляет содержание данной работы.

Для уяснения природы возможных погрешностей устройства рассмотрим вкратце физическую сторону его работы.

При отсутствии входного (интегрируемого) напряжения $U_1(t)$ якорная цепь двигателя 3 обесточена, и якорь неподвижен. Поступление на вход устройства напряжения $U_1(t)$ обуславливает появление на входе усилителя напряжения рассогласования ΔU_y , которое усиливается по напряжению и по мощности и обеспечивает скорость вращения якоря двигателя и ротора тахометра, необходимую для поддержания равенства

$$U_1(t) - U_T(t) = \Delta U_y.$$

Установившийся режим работы устройства характеризуется напряжением рассогласования ΔU_y , величина которого зависит от статического момента нагрузки M_c и коэффициента усиления μ .

Расчет точности интегратора

Для вывода расчетных формул ошибок интегратора произведем математический анализ его работы.

Уравнение следящего двигателя, без учета „жидкостного трения“, имеет вид

$$U_m = k_1 p^2 \varphi + k_2 p \varphi \pm k_3, \quad (3)$$

где

$$k_1 = \frac{I_0}{m_0};$$

I_0 — приведенный к валу двигателя момент инерции элементов кинематической линии „двигатель-тахометр“ и „двигатель-выходной вал 5“;

$$I_0 = I_m + I_T + I_5;$$

m_0 — удельный пусковой момент двигателя;

k_2 — противоэлектродвижущая сила якоря при $p\varphi = 1 \frac{1}{\text{сек.}}$;

$k_3 = \frac{M_c}{m_0}$ — напряжение трогания.

С другой стороны, выходное напряжение усилителя равно

$$U_m = \mu (U_1 - k_4 p \varphi) - T_y p U_m, \quad (4)$$

где

μ — коэффициент усиления усилителя;

k_4 — крутизна характеристики тахометра;

T_y — постоянная времени усилителя.

Решая (3) и (4) относительно угла поворота выходного валика 5, получаем

$$\varphi_p = \frac{U_1 \pm \frac{k_3}{\mu}}{p \left[\left(\frac{k_2}{\mu} + k_4 \right) + \frac{k_1}{\mu} p + \left(\frac{k_1 + k_2 T_y}{\mu} \right) p^2 \right]}. \quad (5)$$

Введем в формулу (5) величину приведенной постоянной времени двигателя $T_{\partial} = \frac{k_1}{k_2}$, для чего разделим числитель и знаменатель на k_2

$$\varphi(p) = \frac{\frac{U_1 \pm \frac{k_3}{k_2} \cdot \frac{1}{\mu}}{\frac{1}{\mu} + \frac{k_4}{k_2} + \frac{T_y + T_{\partial}}{\mu} p + \frac{T_y \cdot T_{\partial}}{\mu} p^2}}{p(a_3 + a_4 p + p^2)} = \frac{a_1 U_1 \pm a_2}{p(a_3 + a_4 p + p^2)}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\mu}{k_2 T_{\partial} T_y} \left[\frac{1}{s \cdot \text{сек}^3} \right]; \\ a_2 &= \frac{k_3}{k_2 T_{\partial} T_y} \left[\frac{1}{\text{сек}^3} \right]; \\ a_3 &= \frac{\mu k_4}{k_2 T_{\partial} T_y} + \frac{1}{T_{\partial} \cdot T_y} \left[\frac{1}{\text{сек}^2} \right]; \\ a_4 &= \frac{T_{\partial} + T_y}{T_{\partial} \cdot T_y} \left[\frac{1}{\text{сек}} \right]. \end{aligned}$$

Теоретическое значение интеграла от входного напряжения $U_1(t)$ очевидно равно

$$\varphi(p)_T = \frac{a_1}{a_3} \cdot \frac{U_1(p)}{p}. \quad (7)$$

Рассмотрим возможные источники ошибок интегрирования, считая, что точность интегрирующего привода можно охарактеризовать ошибкой положения его выходного звена-валика 5.

Прежде всего, из сравнения передаточных функций реального (6) и идеального (7) интеграторов можно сделать вывод о наличии методической ошибки интегрирования, определяемой разностью вида

$$\begin{aligned} (\Delta\varphi)_{мет} &= U_1(p) [h(p)_{нр\acute{а}кт} - h(p)_{теор}] = \\ &= -U_1(p) \frac{a_1}{a_3} \frac{1}{p} \left[\frac{p(a_4 + p)}{a_3 + a_4 p + p^2} \right] + \frac{a_2}{p[a_3 + a_4 p + p^2]} = (\Delta\varphi)'_{мет} + (\Delta\varphi)''_{мет}. \quad (8) \end{aligned}$$

Составляющая $(\Delta\varphi)'_{мет}$ методической ошибки зависит от закона изменения интегрируемого напряжения и параметров устройства, ее абсолютная величина возрастает („накапливается“) во времени.

Вторая составляющая $(\Delta\varphi)''_{мет}$ ошибки характеризует влияние статического момента нагрузки на точность работы интегратора, величина этой составляющей определяется „чувствительностью“ усилителя.

Очевидно, что кроме методической ошибки, являющейся основной ошибкой интегратора, при работе последнего в конкретных условиях и с использованием конкретных элементов будет иметь место дополнительная ошибка, обусловленная наличием помех в интегрируемом напряжении, изменением внешних факторов (температуры, влажности и т. д.) и, наконец, классом точности изготовления элементов интегратора.

Влияние перечисленных факторов на точность работы интегратора учитывается по формуле

$$\left. \begin{aligned} (\Delta\varphi)_{дон} &= \frac{a_1 \Delta U}{p(a_3 + a_4 p + p^2)}, \\ \Delta U &= \Delta U_T + \Delta U_{др} + \Delta U_n + \Delta U_{\phi}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

В формуле (9) обозначено:

ΔU_T — ошибка тахометрического элемента, зависящая в общем случае от класса точности его изготовления, стабильности напряжения возбуждения, изменения температуры окружающей среды и стабильности частоты напряжения при работе устройства на переменном токе;

$\Delta U_{др}$ — ошибка из-за „дрейфа“ усилителя при работе устройства на постоянном токе;

ΔU_n — помехи, наложенные на действительный закон изменения интегрируемого напряжения;

ΔU_{ϕ} — фазовая ошибка напряжения рассогласования устройства.

Суммарная погрешность интегратора равна сумме основной и дополнительной ошибок, т. е.

$$\Delta\varphi = (\Delta\varphi)_{мет} + (\Delta\varphi)_{дон}.$$

Практический критерий точности интегратора, определяемый приведенной относительной ошибкой, будет соответственно

$$\delta\varphi^0/0 = 100 \frac{\Delta\varphi}{\varphi_{max}},$$

где

φ_{max} — предельное значение интеграла за рабочее время интегрирования t .

Приведенная относительная ошибка интегрирования может быть определена также по формуле

$$\delta\varphi^0/0 = 100 \frac{\Delta\Omega}{\Omega_{max}}, \quad (10)$$

где

$\Delta\Omega$ — суммарная ошибка интегратора в единицах скорости вращения выходного валика;

Ω_{max} — максимальная скорость вращения этого же валика, соответствующая максимальному значению интегрируемого напряжения.

Используя формулу (10), можно дать простую оценку точности интегратора в установившемся режиме работы.

Действительно, для ошибки $\Delta\Omega$:

$$\Delta\Omega = p\Delta\varphi = \frac{1}{a_3 + a_4 p + p^2} \left\{ \pm a_2 + a_1 \Delta U - U_1(p) \frac{a_1}{a_3} [a_4 p + p^2] \right\} = \frac{F(p)}{a_3 + a_4 p + p^2}. \quad (11)$$

Обычно в реальных условиях работы интегратора интегрируемое напряжение U_1 , а также первичные ошибки ΔU_T , ΔU_{dp} , ΔU_n , ΔU_ϕ конечны, имеют конечные производные и могут быть представлены в виде степенного ряда с числом членов не более трех. В этом случае для суммарной ошибки интегратора в установившемся режиме получаем:

$$\Delta\Omega = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} - \frac{1}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} \int_0^t e^{-p_1 \tau} F(\tau) d\tau - \\ - \frac{1}{p_1 - p_2} e^{p_2 t} \int_0^t e^{-p_2 \tau} F(\tau) d\tau.$$

Полагая

$$[\Delta\Omega]_{t=0} = 0, \quad [\Delta\Omega']_{t=0} = 0,$$

имеем:

$$\Delta\Omega = \frac{1}{p_1 - p_2} \left[e^{p_1 t} \int_0^t e^{-p_1 \tau} F(\tau) d\tau - e^{p_2 t} \int_0^t e^{-p_2 \tau} F(\tau) d\tau \right]. \quad (12)$$

Решение для $(\Delta\Omega)$ получаем путем интегрирования по частям выражения (12):

$$\Delta\Omega = \frac{1}{p_1 - p_2} \left\{ e^{p_1 t} \left[-\frac{1}{p_1} e^{-p_1 t} F(t) - \frac{1}{p_1^2} e^{-p_1 t} F'(t) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{p_1^3} e^{-p_1 t} F''(t) + \dots + \frac{1}{p_1^n} \int_0^t e^{-p_1 \tau} F^{(n)}(\tau) d\tau \right] - \right. \\ \left. - e^{p_2 t} \left[-\frac{1}{p_2} e^{-p_2 t} F(t) - \frac{1}{p_2^2} e^{-p_2 t} F'(t) + \dots \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{p_2^n} \int_0^t e^{-p_2 \tau} F^{(n)}(\tau) d\tau \right] \right\} = \frac{1}{p_1 \cdot p_2} F(t) + \\ + \frac{p_1 + p_2}{p_1^2 \cdot p_2^2} F'(t) + \frac{p_1^2 + p_1 \cdot p_2 + p_2^2}{p_1^3 \cdot p_2^3} F''(t) + \dots \\ + \frac{1}{(p_1 - p_2) p_1^n} e^{p_1 t} \int_0^t e^{-p_1 \tau} F^{(n)}(\tau) d\tau + \\ + \frac{1}{(p_1 - p_2) p_2^n} e^{p_2 t} \int_0^t e^{-p_2 \tau} F^{(n)}(\tau) d\tau.$$

Учитывая, что $n \leq 3$, имеем

$$\Delta\Omega = \frac{F(t)}{p_1 \cdot p_2} + F'(t) \frac{p_1 + p_2}{p_1^2 \cdot p_2^2} + \\ + F''(t) \frac{p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2}{p_1^3 \cdot p_2^3} + F'''(t) \frac{p_1^3 + p_1^2 p_2 + p_1 p_2^2 + p_2^3}{p_1^4 \cdot p_2^4}.$$

Для комплексно-сопряженных корней

$$p_1 = -\alpha + j\beta; \quad p_2 = -\alpha - j\beta,$$

соответствующих оптимальному переходному режиму интегратора, получаем:

$$\Delta\Omega = F(t) \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} - F'(t) \frac{2\alpha}{(\alpha^2 + \beta^2)^2} + \\ + F''(t) \frac{3\alpha^2 - \beta^2}{(\alpha^2 + \beta^2)^3} - F'''(t) \frac{5\alpha^3 - 4\alpha\beta^2}{(\alpha^2 + \beta^2)^4}. \quad (13)$$

Формулы (9)–(13) справедливы для расчета ошибок как конкретного образца интегратора, так и для серии интеграторов, смонтированных из элементов заданного класса точности. В последнем случае речь должна идти о вероятностной оценке точности серии интеграторов. При этом все первичные ошибки, как правило, являются случайными переменными величинами, следовательно, и ошибка интегратора также будет случайной величиной.

Если случайные первичные ошибки не зависят от времени, то для вероятностного расчета точности достаточно знания вероятностных законов распределения этих ошибок или характеристик законов — математического ожидания A_k и дисперсии D_k^2 , определяющих среднее значение и рассеивание соответствующих первичных ошибок.

Для наиболее распространенного закона распределения ошибок — нормального закона — имеем:

$$A_k = \frac{1}{2}(q_k + m_k); \quad D_k^2 \approx \frac{1}{9}\Delta_k^2,$$

где

Δ_k — половина поля допуска;

q_k, m_k — границы поля допуска (рис. 2).

Тогда на основании теорем о среднем значении и дисперсии суммы независимых случайных величин для относительной приведенной ошибки получают математическое ожидание относительной ошибки

$$A_{\Delta\Omega} = \sum_{k=1}^{k=n} A_k,$$

и дисперсию относительной ошибки

$$D_{\Delta\Omega}^2 = \sum_k D_k^2.$$

Считая, что суммарная ошибка интегратора распределена по нормальному закону, для практического предельного значения этой

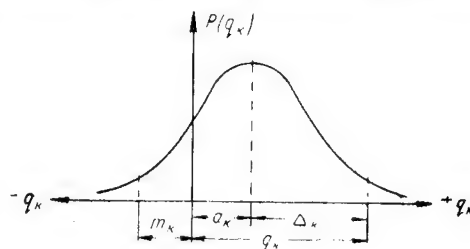


Рис. 2.

ошибки получаем

$$(\Delta\Omega)_{\max} = |A_{\Delta\Omega}| + 3D_{\Delta\Omega}.$$

Следует отметить, что в большинстве случаев работы интегратора как интегрируемое напряжение U_1 , так и первичные ошибки являются случайными функциями времени. Поэтому для расчета точности в подобных случаях необходимо пользоваться методами статистической динамики, в соответствии с которыми может быть рекомендован следующий порядок расчета.

1) Определяется вид передаточных функций для всех составляющих относительной ошибки:

а) для ошибки $(\Delta\Omega)'_{мет} = (\Delta\Omega)_1$

$$\Phi_1 = \frac{\frac{a_1}{a_3} (a_4 + j\omega_0) \cdot j\omega_0}{a_3 + a_4 j\omega_0 + (j\omega_0)^2};$$

б) для ошибки $(\Delta\Omega)''_{мет} = (\Delta\Omega)_2$

$$\Phi_2 = \frac{1}{a_3 + a_4 j\omega_0 + (j\omega_0)^2};$$

в) для ошибок $(\Delta\Omega)_{дон}$

$$\Phi_3 = \frac{a_1}{a_3 + a_4 j\omega_0 + (j\omega_0)^2}.$$

2) Определяются спектральные плотности $S(\omega_0)$ для входного сигнала и первичных ошибок

$$S_{u_1}(\omega_0); S_{a_2}(\omega_0); S_{\Delta u_T}(\omega_0); S_{\Delta u_{\partial p}}(\omega_0); S_{\Delta u_n}(\omega_0); S_{\Delta u_f}(\omega_0).$$

3) Рассчитываются среднеквадратические ошибки $[(\Delta\Omega)_k]_{\sigma}$

$$[(\Delta\Omega)_k]_{\sigma} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \{ |\Phi_k(j\omega_0)|^2 \cdot S_k(\omega_0) \} d\omega_0, \\ (k = 1, 2, \dots)$$

4) Рассчитывается суммарная ошибка интегратора

$$(\Delta\Omega)_{\sigma} = \sqrt{\sum_k (\Delta\Omega_k)_{\sigma}^2}.$$

При проведении статистического расчета необходимо иметь большой экспериментальный материал для вероятностной характеристики исходных данных — интегрируемого напряжения и первичных ошибок.

Методы уменьшения ошибок интегратора

Анализируя формулы для расчета точности электромеханического интегратора, можно сделать следующие выводы:

1) Дополнительная ошибка интегратора может быть уменьшена за счет повышения точности работы устройств, вырабатывающих

интегрируемое напряжение, повышения точности изготовления, сборки и регулировки применяемых элементов (тахометра, усилителя, кинематических звеньев), стабилизации напряжения возбуждения и компенсации влияния изменения температуры и влажности окружающей среды.

2) Даже при тщательном выполнении вышеуказанных требований и сведении дополнительной ошибки до пренебрежимо малой величины, любой интегратор рассматриваемого типа обладает методической (основной) ошибкой, величина которой может значительно превосходить ошибку дополнительную и существенно снижать точность интегрирования.

Ниже рассматривается влияние методической ошибки на точность работы устройства и способы уменьшения этой ошибки.

Ранее было отмечено, что методическая ошибка интегратора содержит две составляющие, причем, как показывают исследования, вторая составляющая, учитывающая влияние статического момента нагрузки, в большинстве случаев работы интегратора изменяется по линейному закону и имеет незначительную величину. Поэтому оценим величину и выясним закон изменения первой составляющей методической ошибки.

Используя формулу (13) для этой составляющей, имеем:

$$\Delta\varphi_{мет} = \frac{1}{p} \Delta\Omega \leq F(t) \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} = U_1(t) \frac{1}{\alpha^2 + \beta^2} [b_1 + b_2 p],$$

или, так как $b_1 \gg b_2$, то окончательно

$$\Delta\varphi_{мет} \approx \frac{b_1}{\alpha^2 + \beta^2} U_1(t).$$

Следовательно, работа электромеханического интегратора при входном (интегрируемом) напряжении, изменяющемся по параболическому закону

$$U_1(t) = \sum_1^n U_{ok} t^k,$$

сопровождается методической ошибкой $\Delta\varphi_{мет}$ той же закономерности.

Для большинства практических схем интеграторов величина коэффициента $\frac{b_1}{\alpha^2 + \beta^2}$ колеблется в пределах $0,01 \div 0,03$, что свидетельствует о существенном влиянии первой составляющей методической ошибки на точность интегрирования. Одним из способов уменьшения этой ошибки является применение корректирующих звеньев, приближающих передаточную функцию реального интегратора к передаточной функции интегратора „идеального“.

Рассмотрим прежде всего применение последовательных корректирующих звеньев (см. табл.)

Таблица

N/N n/n	Схема включения корректирующего звена	Вид передаточной функции корректирующего звена
1		$h_{korr} = 1 + \beta_1 p + \beta_2 p^2$
2		
3		
4		$h_{korr} = C_1 p + C_2 p^2$
5		
6		
7		$h_{korr} = \pm (1 + \rho T_y)$
8		
9		

Можно показать, что в зависимости от места включения последовательного корректирующего звена его передаточная функция имеет одно из следующих выражений:

$$h_{1кopp} = 1 + b_1p + b_2p^2; \quad (14')$$

$$h_{2кopp} = c_1p + c_2p^2; \quad (14'')$$

$$h_{3кopp} = \frac{d_1 + d_2p}{c_3 + c_4p + c_5p^2}. \quad (14''')$$

Оценивая этот способ коррекции, необходимо отметить, что синтез корректирующих последовательных звеньев с указанными передаточными функциями может быть осуществлен только по схеме активного четырехполюсника и при условии независимости коэффициентов при различных степенях p , что, в свою очередь, усложняет практическую реализацию данного метода. Однако, учитывая предыдущие замечания о соотношении коэффициентов при p и p^2 в формуле методической ошибки (13), можно существенно упростить задачу синтеза последовательных корректирующих звеньев, отбрасывая в их передаточных функциях члены, содержащие p^2 . Тогда вместо передаточных функций (14'), (14'') имеют место соответствующие функции

$$h_{1кopp} = 1 + b_1p;$$

$$h_{2кopp} = c_1p;$$

$$h_{3кopp} = \frac{d_1 + d_2p}{c_3 + c_4p},$$

которые могут быть реализованы при помощи либо активных, либо пассивных четырехполюсников.

Коррекция ошибки при помощи параллельного звена может быть использована, например, в том случае, когда результат интегрирования снимается в виде напряжения, а не угла поворота валика δ .

При этом коррекцию обеспечивает параллельное звено с передаточной функцией

$$h_k = \frac{d_1 + d_2p}{d_3 + d_4p + d_5p^2}. \quad (15)$$

Действительно, передаточная функция скорректированного интегратора имеет вид

$$H(p) = \frac{a_1}{p(a_3 + a_4p + p^2)} + \frac{d_1 + d_2p}{d_3 + d_4p + d_5p^2}.$$

При выполнении условия $a_3 + a_4p + p^2 = d_3 + d_4p + d_5p^2$

$$H(p) = \frac{a_1 + d_1p + d_2p^2}{p(a_3 + a_4p + p^2)},$$

следовательно, методическая ошибка определяется выражением

$$(\Delta\varphi)_{мет} = U_1(p) \frac{(d_1a_3 - a_1a_4) + (d_2a_3 - a_1)p}{a_3(a_3 + a_4p + p^2)}.$$

Очевидно, что при подборе коэффициентов d_1 и d_2 по формулам

$$d_1 = \frac{a_1 \cdot a_4}{a_3}; \quad d_2 = \frac{a_1}{a_3}$$

методическая ошибка интегратора равна нулю. Однако в данном случае задача синтеза корректирующего звена с передаточной функцией (15) остается весьма сложной ввиду необходимости выполнения независимости коэффициентов при p . Последнее условие может быть выполнено при использовании активных четырехполюсников.

Более простая коррекция параллельным звеном выполняется путем простого добавления части входного напряжения к напряжению

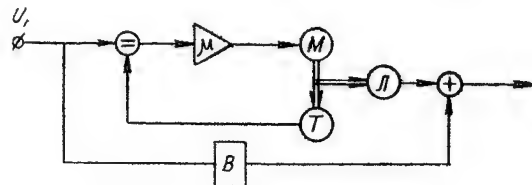


Рис. 3.

выходному (рис. 3). В этом случае передаточная функция скорректированного интегратора имеет вид

$$H(p) = \frac{a_1 k_L + a_3 B p + a_4 B p^2 + B p^3}{p(a_3 + a_4 p + p^2)}.$$

Соответственно методическая ошибка определяется по формуле

$$(\Delta\varphi)_{мет} = U_1(p) \frac{(a_3^2 B - a_1 a_4 k_L) + (a_4 B - a_1 k_L) p + B p^2}{p a_3 (a_3 + a_4 p + p^2)}.$$

При

$$B = \frac{a_1 \cdot a_4}{a_3^2} k_L,$$

где k_L — коэффициент пропорциональности между углом поворота φ_n и выходным напряжением $U_{вых}$,

$$(\Delta\varphi)_{мет} = U_1(p) \frac{(a_1 k_L - B a_3 a_4) p - a_3 B p^2}{a_3 (a_3 + a_4 p + p^2)}.$$

При таком способе коррекции методическая ошибка полностью не компенсируется, так как остаются составляющие ошибки, равные

$$(\Delta\varphi)_{мет I} = \frac{p(a_1 k_L - B a_3 a_4)}{a_3 (a_3 + a_4 p + p^2)};$$

$$(\Delta\varphi)_{мет II} = -\frac{B p^2}{a_3 + a_4 p + p^2}.$$

Эти составляющие равны нулю в установившемся режиме для постоянного входного напряжения и постоянны при линейном входном напряжении, что позволяет произвести ее дальнейшее уменьшение путем масштабных расчетов.

Следует отметить, что коэффициент B может быть всегда выбран для реальных схем интеграторов меньше единицы; поэтому коррекция не требует наличия активных четырехполюсников при работе на постоянном токе и одинаково просто выполняется для любого тока питания устройства.

ЛИТЕРАТУРА

Т. Н. Соколов, Электромеханические системы автоматического управления, Госэнергоиздат, 1952.

Поступила в ноябре 1956 г. _____

Ассистент В. А. ОЛЕЙНИКОВ

РАБОТА МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ В ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ИЛИ УПРАВЛЕНИЯ

В работе [1] установлена возможность применения графического метода расчета переходных процессов в магнитном усилителе, работающем в импульсном режиме. В этой же работе показано влияние стороны переменного тока, т. е. выхода, на вход магнитного усилителя, выражающееся в затягивании переходного процесса и в возникновении низкочастотных биений. Показана возможность форсировки переходного процесса в импульсном режиме за счет их амплитуды.

В данной работе даются рекомендации по расчету импульсных систем автоматического регулирования и управления с использованием магнитных усилителей. Такие системы уже находят применение в промышленности. В качестве примера можно привести систему подачи электрода-инструмента в электроимпульсных станках, где обмотка управления магнитного усилителя, управляющего двигателем подачи электрода, питается импульсами напряжения повышенной частоты (400—500 гц). Импульсные системы регулирования могут найти применение также в системах регулирования и стабилизации скорости вращения двигателя или напряжения генераторов. Для систем регулирования напряжения генератора проще формировать импульсы постоянной амплитуды и частоты, но переменной длительности τ , пропорциональной напряжению [2]. Для систем регулирования скорости вращения желательно формировать импульсы постоянной амплитуды и длительности, но с переменным периодом T , пропорциональным скорости вращения двигателя. Оба эти случая можно объединить, если ввести понятие об относительной длительности импульса $\gamma = \frac{\tau}{T}$, которая, как видно, зависит и от длительности и от периода в одинаковой степени.

Введением импульсного элемента в систему автоматического регулирования или управления в некоторых случаях можно значи-

тельно ее упростить, повысить стабильность и быстродействие, что является немаловажным фактором.

Несмотря на положительные факторы, перечисленные выше, импульсным системам свойственны и некоторые недостатки, которые в отдельных случаях могут сделать их применение невозможным. В частности, это относится к системам, содержащим однотактный магнитный усилитель, обмотка управления которого работает от импульсного элемента с переменной частотой импульсов. В этом случае при некоторых частотах импульсов в обмотке управления магнитного усилителя наблюдаются низкочастотные биения, которые, усиливаясь, трансформируются на выход магнитного усилителя.

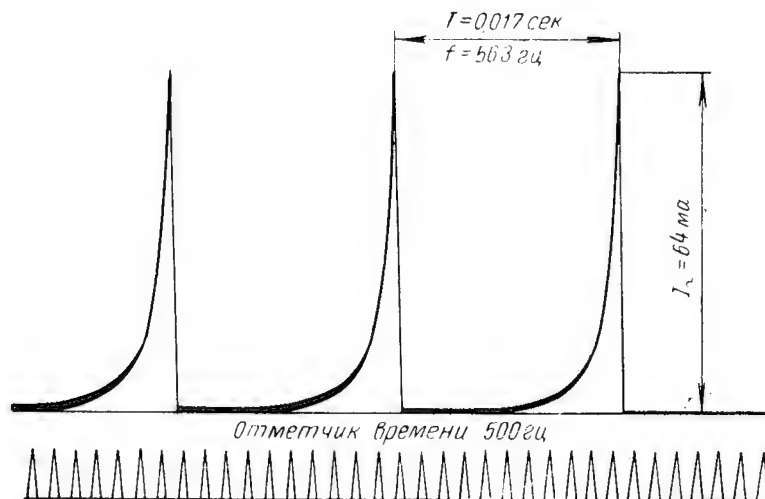


Рис. 1. Осциллограмма импульсов тока в обмотке управления магнитного усилителя

Низкочастотные биения возникают от сложения четных гармоник с импульсами тока на частотах импульсов, близких или кратных частотам четных гармоник. Четные же гармоники тока возникают в замкнутом контуре обмотки управления. Вообще частота биений меняется в широких пределах в зависимости от частоты импульсов, но для систем регулирования важны именно низкочастотные биения, которые могут усиливаться и пропускаться всей системой. Так, при питании магнитного усилителя переменным током частотой 50 гц (основная четная гармоника 100 гц) биения возникают на частотах 20, 25, 50, 100 гц. Наибольшая амплитуда биений наблюдается при частоте импульсов, близких к 100 гц. Биения возникают от сложения токов: синусоидальных четных гармоник и периодического тока импульсов.

Докажем возникновение биений на частотах, близких или кратных частоте четных гармоник. На рис. 1 показаны импульсы

частоты 56,3 гц и амплитуды 68 ма. Вторая гармоника разложения этих импульсов должна давать низкочастотные биения в сумме с четной гармоникой 100 гц.

Математически разложить импульсы тока не представляется возможным, так как не известно их аналитическое выражение. Поэтому применим метод Перри для нахождения 2-й гармоники. В этом методе интегралы в выражении для величин амплитуд гармоник заменяются конечными суммами:

$$f(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{k=p} A_k \sin k\omega t + \sum_{k=1}^{k=p} B_k \cos k\omega t. \quad (1)$$

Для нахождения A_k и B_k разбивают период функции на $2n$ равных частей t_m . Тогда выражения для A_k и B_k будут иметь вид

$$A_k = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{m=2n} y_m \sin k\omega t_m, \quad (2)$$

$$B_k = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{m=2n} y_m \cos k\omega t_m, \quad (3)$$

$$C_0 = \frac{1}{2n} \sum_{m=1}^{m=2n} y_m, \quad (4)$$

где y_m — значение ординаты, соответствующее t_m . Данным методом были разложены импульсы тока в ряд Фурье, который имеет вид:

$$i(t) = 7,4 + 6,91 \sin \omega t + 6,69 \cos \omega t + 6,9 \sin 2\omega t + 2,8 \cos 2\omega t.$$

Дальше второй гармоники разложение не ведем, так как частота 2-й гармоники 112,6 гц как раз и будет давать низкочастотные биения.

Примем, что четные гармоники в замкнутом контуре обмотки управления магнитного усилителя совпадают по фазе со 2-й гармоникой разложения и сложим 2 синусоидальных тока

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega_1 t;$$

$$i_2 = I_{2m} \sin \omega_2 t.$$

Положив,

$$\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \omega \quad \text{и} \quad \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} = \omega',$$

получим

$$i_1 + i_2 = I_m \sin \omega t, \quad (5)$$

где

$$I_m = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2 + 2I_{1m}I_{2m}\cos 2\omega' t}. \quad (6)$$

Отсюда сразу находим частоту биений

$$\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} = \frac{2\pi(f_1 - f_2)}{2} = 2\pi f';$$

$$f' = \frac{f_1 - f_2}{2} = \frac{112,6 - 100}{2} = 6,3 \text{ гц.}$$

По опытным данным амплитуда четной гармоники тока равна примерно 2 ма.

$$I_{1m} = 6,9 \text{ ма}; \quad I_{2m} = 2 \text{ ма};$$

$$I_{max} = \pm \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2 + I_{1m}I_{2m}2} = \pm \sqrt{(I_{1m} + I_{2m})^2} = I_{1m} + I_{2m} = 8,9 \text{ ма}$$

при $\cos 2\omega't = 1$;

$$I_{min} = \pm \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2 - I_{1m}I_{2m}2} = \pm \sqrt{(I_{1m} - I_{2m})^2} = I_{1m} - I_{2m} = 4,9 \text{ ма}$$

при $\cos 2\omega't = -1$.

В данном примере показана возможность возникновения биений в обмотке управления магнитного усилителя на частоте, кратной

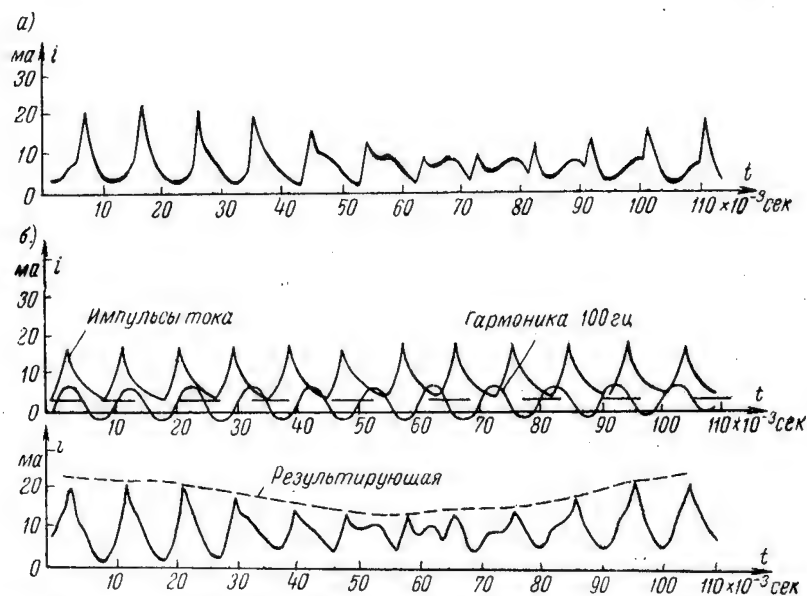


Рис. 2. Графическое сложение импульсов тока четной гармоники 100 гц

а — опытная осциллограмма; б — графическое сложение

четным гармоникам. Вообще картина биений далеко не так проста, так как складываться будет весь ряд с четной гармоникой.

Для определения частоты и амплитуды биений можно воспользоваться прямым графическим сложением этих двух токов. Такое графическое сложение показано на рис. 2 и здесь же приведена опытная осциллограмма. Так как принцип сложения гармоник и

импульсов тока справедливы для любых частот последних, то для примера взята частота импульсов 110 гц, четная гармоника 100 гц (питание магнитного усилителя переменным током 50 гц). Кроме этого, при частоте импульсов, близкой к 100 гц, амплитуда биений наибольшая. Период биений для случая, приведенного на рис. 2, получается равным 0,12 сек, т. е. 8 гц. Для определения амплитуды биений следует произвести подсчет среднего значения тока за период импульса для максимума и минимума, что также удобнее сделать графически по методу Перри (3). Определение амплитуды биений не приводится, ввиду его простоты и известности.

При повышении частоты импульсов выше частоты основной четной гармоники в 1,5—2 раза низкочастотные биения исчезают и при дальнейшем повышении частоты не наблюдаются. В этом случае импульсы управляющего тока просто модулируются четными гармониками. Данное положение иллюстрируется осциллограммой на рис. 3, где частота импульсов равна 400 гц. Отсюда следует

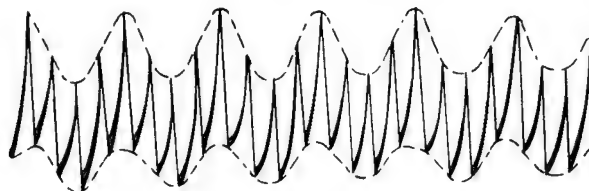


Рис. 3. Модуляция импульсов 400 гц четной гармоникой 100 гц

сделать вывод, что одноконтурный магнитный усилитель, с шунтированной сопротивлением обмоткой управления, может работать без низкочастотных биений только при частоте импульсов, в 1,5—2 раза превышающих частоту основной четной гармоники.

Другим важным фактором, влияющим на работу магнитного усилителя в импульсной системе регулирования, является нелинейная зависимость напряжения на выпрямителе от напряжения на дросселе:

$$U_{вып} = f(U_{др}).$$

При активной нагрузке напряжения на дросселе и на выпрямителе можно принять находящимися в квадратуре, т. е.

$$U^2 = U_{вып}^2 + U_{др}^2, \quad (7)$$

где

U — напряжение питания магнитного усилителя;

$U_{др}$ — напряжение на дросселе;

$U_{вып}$ — напряжение на выпрямителе.

На рис. 4 показаны экспериментальная, для стали ХВП, и теоретическая зависимости $U_{вып} = f(U_{др})$. Следует отметить, что для обыкновенной электротехнической стали квадратичная зависимость между напряжением на дросселе и выпрямителе хорошо согласуется

с опытом. Для специальных сталей, имеющих ярко выраженную зону насыщения, квадратичная зависимость между напряжением на дросселе и на выпрямителе не выдерживается, что и видно на рис. 4. Для таких сталей следует пользоваться экспериментальной зависимостью $U_{вып} = f(U_{др})$. Если среднее значение тока импульсов в обмотке управления будет соответствовать работе в точке А на характеристике $U_{вып} = f(U_{др})$, то токи на выходе в импульсе, больше этого среднего значения, будут срезаться, т. е. при увеличении подмагничивания $U_{др}$ стремиться к 0, и ток в нагрузке

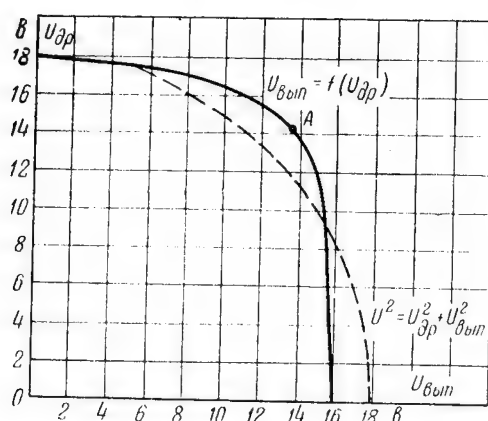


Рис. 4. Экспериментальная и теоретическая зависимости $U_{вып} = f(U_{др})$

определяется только ее сопротивлением. При уменьшении среднего значения тока импульсы вторичной цепи будут выражены более отчетливо. Данное положение иллюстрируется осциллограммами тока во вторичной цепи, показанными на рис. 5. Осциллограммы сняты для частоты импульсов 200 и 400 гц и из них явно видно весьма значительное ограничение амплитуды импульсов, которые почти не влияют на форму выходного тока. В основном происходит усиление только среднего значения тока. Таким образом, магнитный усилитель выступает как звено, усредняющее импульсы, подаваемые на его вход. Усреднение будет выражено ярче у магнитных усилителей, выполненных из материала с ярко выраженным насыщением, чем у усилителей, выполненных из обыкновенной электротехнической стали.

Учитывая сказанное, магнитный усилитель, работающий в импульсном режиме, можно считать усилителем среднего значения тока импульсов. Тогда уравнение для него в установившемся режиме будет иметь следующий вид:

$$i_{ср}k = i_{вых},$$

где

i_{cp} — среднее значение тока импульсов;
 k — коэффициент усиления магнитного усилителя по току;
 $i_{вых}$ — выходной ток.

Среднее значение тока импульсов связано с относительной длительностью импульса γ соотношением:

$$i_{cp} = k_1 \gamma,$$

где

γ — относительная длительность;
 k_1 — коэффициент передачи импульсного звена.

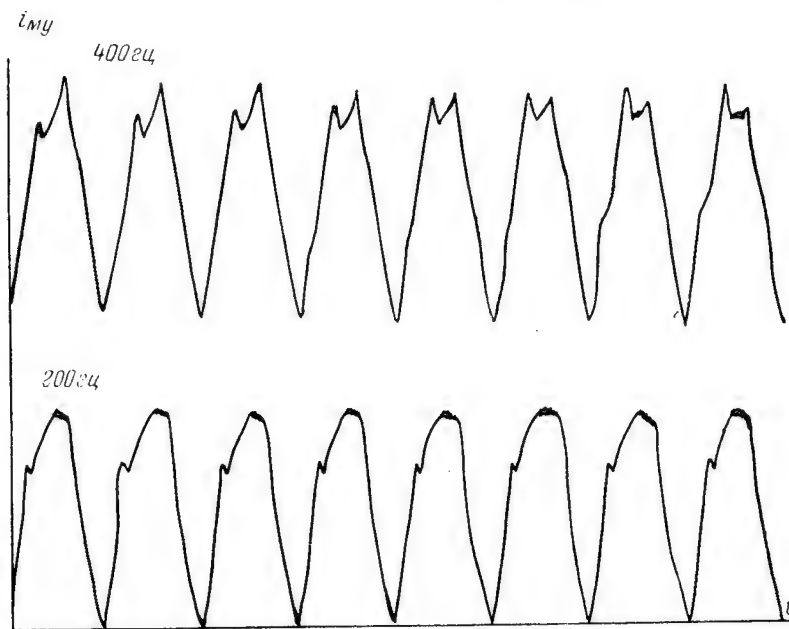


Рис. 5. Выходной ток магнитного усилителя при частоте входных импульсов 400 гц и 200 гц

Если относительная длительность γ пропорциональна входной величине (тока, напряжения, скорости вращения) в системе регулирования, то можно записать следующую зависимость:

$$\gamma = k_2 z_{вх}.$$

Решая эти три уравнения совместно, получаем выражение, связывающее входную и выходную величины в установившемся режиме:

$$i_{вых} = k_1 k_2 k Z_{вх}. \quad (8)$$

Данное уравнение аналогично уравнению обыкновенного линейного звена.

Единственной зависимостью, которую надо рассчитать в последнем уравнении, является зависимость

$$i_{cp} = f(\gamma).$$

Имея картину импульсов, построенную графически или снятую экспериментально для данного магнитного усилителя и для данной области частот, можно графически по методу Перри определить среднее значение тока для трех частот импульсов (минимальная частота, средняя и максимальная для данной области.)

Так как зависимость

$$\gamma = \frac{\tau}{T} = \tau f$$

является линейной, то и характеристика $i_{cp} = f(\gamma)$ также будет линейной, поэтому для построения достаточно трех точек. На рис. 6 приведена зависимость $i_{cp} = f(\gamma)$, полученная экспериментально и путем графического построения. Следует отметить хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных.

Отметим, что наклон характеристики $i_{cp} = f(\gamma)$, а значит, и коэффициент передачи k_1 для данного магнитного усилителя будет зависеть от длительности импульса τ .

Значительно изменяются динамические характеристики магнитного усилителя при импульсном режиме его работы. Как было показано в предыдущей работе [1], переходный процесс в магнитном усилителе при определенных параметрах импульсов заканчивается за 2—3 периода последних, т. е. время переходного процесса сокращается в 10—15 раз по сравнению с нормальным режимом работы. (Под нормальным понимается режим, когда обмотка управления магнитного усилителя включается на номинальное напряжение, соответствующее номинальному току управления.) На рис. 7 показан переходный процесс в обмотке управления магнитного усилителя, построенный графически. Как видно, среднее значение тока возрастает по экспоненте. Поэтому можно ввести понятие об эквивалентной постоянной времени $T_{\theta K}$ для среднего значения тока импульсов. $T_{\theta K}$ определяется обычным способом, т. е. как проекция

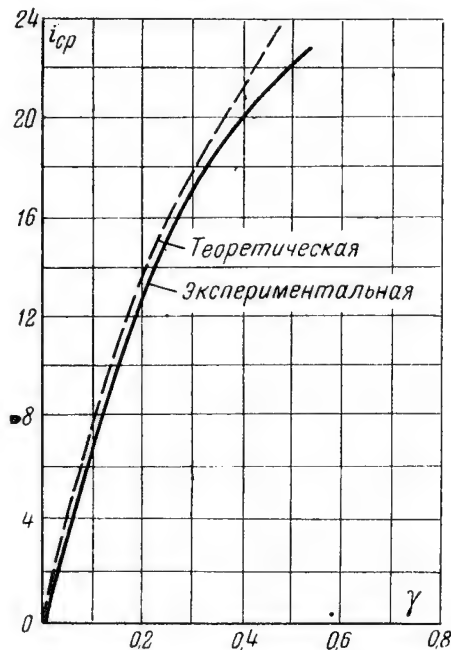


Рис. 6. Зависимость среднего значения тока импульсов от относительной длительности их γ

касательной. Если бы сторона переменного тока не затягивала переходного процесса, то при определенных параметрах импульсов и магнитного усилителя он мог бы заканчиваться за один период импульсов.

Для линейных систем переходный процесс заканчивается за один период импульсов при условии $\beta > 3$, где $\beta = \frac{T}{T_1}$, T — период импульсов, T_1 — постоянная времени магнитного усилителя. Для нелинейных и ненаправленных звеньев такого критерия дать нельзя, так как переходный процесс будет зависеть от амплитуды импульса и от выходной стороны. Поэтому для нелинейных и ненаправленных звеньев приходится менять параметры и для каждого их значения

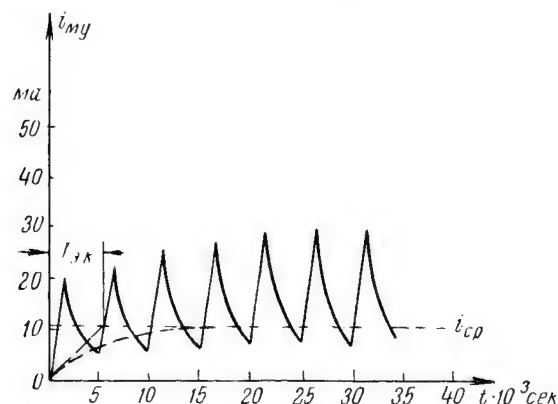


Рис. 7. Переходный процесс в обмотке управления магнитного усилителя и определение $T_{ак}$

определять переходный процесс. Если наименьшая постоянная времени других звеньев, входящих в систему регулирования или управления, в 5—10 раз больше эквивалентной постоянной времени магнитного усилителя $T_{ак}$, что обычно имеет место на практике, то $T_{ак}$ можно пренебречь и считать магнитный усилитель звеном безынерционным. Если же $T_{ак}$ соизмерима с другими постоянными времени системы, то ею пренебрегать нельзя. Для установления этого положения нет необходимости снимать переходный процесс в магнитном усилителе экспериментально, так как его можно построить графически и из построения определить величину $T_{ак}$, что и сделано на рис. 7.

Учитывая сказанное, уравнение магнитного усилителя, работающего в импульсном режиме, можно записать в следующем виде:

$$(1 + T_{ак}p)i_{вых} = ki_{ср}. \quad (9)$$

Таким образом, одноконтный магнитный усилитель в импульсном режиме работы можно считать обыкновенным линейным инерцион-

ным звеном с коэффициентом усиления k и постоянной времени $T_{\text{вк}}$ или безынерционным звеном с тем же коэффициентом усиления k . В импульсном режиме работы устраняется главный недостаток магнитного усилителя — его значительная инерционность, что является существенным фактором.

Магнитный усилитель в импульсном режиме является звеном не-направленного действия, так как выход его оказывает существенное влияние на вход. Это влияние сказывается в том, что понижается значение постоянной составляющей индукции при увеличении переменной составляющей и для поддержания ее прежнего значения

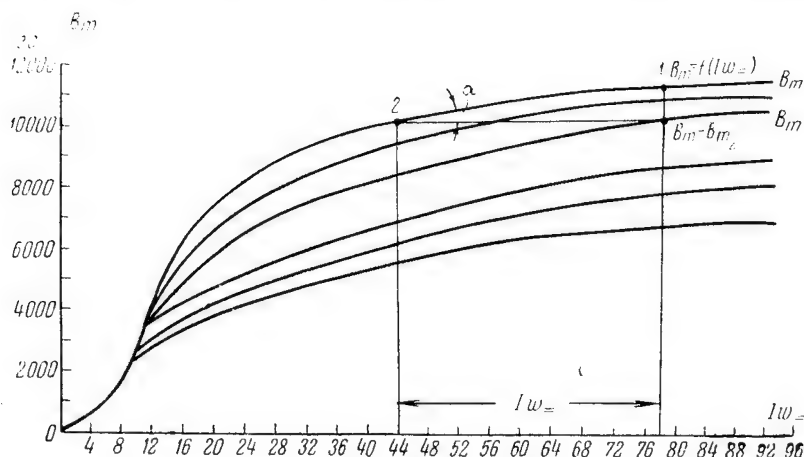


Рис. 8. Зависимость постоянной составляющей индукции от переменной составляющей

требуется увеличивать подмагничивание. Зависимость B_m от различных B_{\sim} показано на рис. 8.

Уравнение для магнитного усилителя, учитывая его ненаправленное действие, можно представить в следующем виде:

$$U_{ax} = iR + \omega_S \frac{dB_{m2}}{dt} + f(B_-), \quad (10)$$

где

$U_{вз}$ — напряжение, приложенное к обмотке управления;

i — ток в обмотке управления;

R — ее сопротивление;

ω — количество витков обмотки управления;

S — сечение магнитопровода;

B_{m_2} — значение индукции при B_{\sim} ;

$f(B_-)$ — член, учитывающий влияние стороны переменного тока.

Этот член показывает, что для сохранения значения B_m без

переменной составляющей, следует увеличить U_{ax} при появлении переменной составляющей.

Функцию $f(B_-)$ можно определить следующим образом: допустим, что без переменной составляющей магнитный усилитель работает в точке 1. При наложении переменной составляющей B_- постоянная составляющая индукции уменьшится на $B_m - B_{m2}$ и магнитный усилитель теперь будет работать в точке 2. Для того, чтобы попасть опять в точку B_m , м. д. с. следует увеличить на $I_1 \omega$. Переходя в уравнении (10) к ампервиткам, его можно записать следующим образом

$$\frac{u_{ax}\omega}{R} = i\omega + \frac{\omega^2 S}{R} \frac{dB_{m2}}{dt} + I_1 \omega \quad (11)$$

или

$$\frac{u_{ax}\omega}{R} - I_1 \omega = i\omega + \frac{\omega^2 S}{R} \frac{dB_{m2}}{dt}. \quad (12)$$

Переходный процесс и амплитуда импульсов в магнитном усилителе в основном зависит от u_{ax} , поэтому его уменьшение за счет переменной составляющей будет замедлять переходный процесс и уменьшать амплитуду импульса.

Если магнитный усилитель работает за точкой перегиба кривой намагничивания, то $f(B_-)$ можно записать в следующем виде:

$$f(B_-) = I_1 \omega = k(B_m - B_{m2}),$$

где $k = \frac{1}{\tan \alpha}$, а α — угол наклона кривой намагничивания с осью абсцисс. Если работа происходит в зоне точки перегиба, то функцию $I_1 \omega = f(B_-)$ следует определить графически из чертежа рис. 8.

Выводы

1. Однотактный магнитный усилитель, работающий в импульсном режиме, с шунтированной обмоткой управления, имеет область частот импульсов, в которой возникают низкочастотные биения. Биения возникают в результате сложения тока четных гармоник и тока импульсов. Чтобы не возникали низкочастотные биения, нижний предел частоты импульсов следует брать в 1,5—2 раза превышающим частоту четных гармоник.

2. Магнитный усилитель в импульсном режиме его работы является усредняющим звеном, т. е. усилителем среднего значения тока импульсов.

3. Импульсный элемент и магнитный усилитель можно заменить эквивалентным апериодическим звеном и вести дальнейшее исследование системы методами обыкновенной линейной теории регулирования.

4. Магнитный усилитель в импульсном режиме является звеном ненаправленного действия. Благодаря этому в нем замедляется переходный процесс и уменьшается амплитуда импульсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Олейников, Графический анализ переходных процессов в нелинейных системах при импульсном режиме их работы, стр. 71 настоящего выпуска.
2. Н. Стефанеску, Применение импульсного принципа воздействия для систем автоматич. регулирования электрических установок, Канд. дисс., ЛЭТИ, 1955.
3. П. А. Шуркевич, Теория переменных токов, Судпромгиз, 1941.

Поступила в апреле 1957 г.

Канд. техн. наук В. Д. БАРЫШНИКОВ

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ С ЭЛЕКТРОМАШИННЫМИ И МАГНИТНЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

Дифференциальная обратная связь в усилителях постоянного тока [1] представляет собою такую обратную связь, при которой на вход усилителя, кроме основного сигнала, подается в той или иной форме еще и разность между выходной и входной величинами. На рис. 1

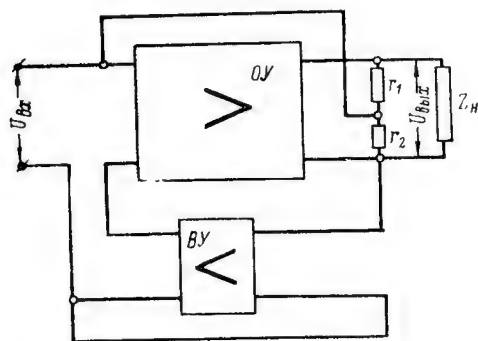


Рис. 1. Структурная схема дифференциальной обратной связи по напряжению

по напряжению. На рис. 1 показана структурная схема дифференциальной обратной связи по напряжению выхода, а на рис. 2 — по выходному току.

В первом случае напряжение, пропорциональное выходному напряжению $U_{вых}$, снимается с потенциометра $r_1—r_2$, сравнивается с напряжением на входе $U_{вх}$ и результат сравнения через вспомогательный усилитель $ВУ$ подается на вход; во втором случае с входным напряжением сравнивается падение напряжения на сопротивлении r_m , пропорциональное выходному току, и результат сравнения также через вспомогательный усилитель подается на вход.

Дифференциальная обратная связь, придавая усилителю все те положительные качества, которые соответствуют жесткой отрицательной обратной связи [2], не уменьшает коэффициента усиления усилителя и имеет другие положительные качества. Недостатком такой связи в усилителях постоянного тока является обязательное

наличие электрической связи между входными и выходными цепями усилителя. Однако в большинстве случаев этот недостаток не имеет существенного значения.

Условием применимости дифференциальной обратной связи в усилителях постоянного тока является отсутствие непосредственной электрической связи между входными и выходными зажимами усилителя. Поэтому, а также учитывая возможность использования для обратной связи отдельной обмотки управления, в связи с чем отпадает необходимость во вспомогательном усилителе для об-

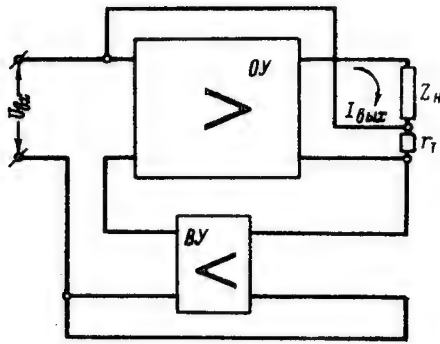


Рис. 2. Структурная схема дифференциальной обратной связи по току

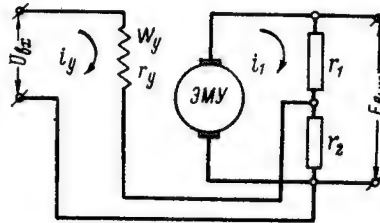


Рис. 3. Схема жесткой отрицательной обратной связи в ЭМУ

ратной связи, — особенно удобно применять дифференциальную обратную связь в системах автоматического управления и регулирования с электромашинными и магнитными усилителями.

Рассмотрим сначала обычную жесткую отрицательную обратную связь в электромашинном усилителе, когда основной сигнал и обратная связь действуют на одну и ту же обмотку управления (рис. 3).

Линеаризуя характеристики ЭМУ для схемы, изображенной на рис. 3, будет действительна при холостом ходе усилителя система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_{вх} &= (r_y + r_2) i_y + r_2 i_1 + w_y p \Phi_y; \\ E_{вхх} &= (r_1 + r_2) i_1 + r_2 i_y; \\ \Phi_y &= c_{\Phi} w_y i_y; \\ E_{вхх} &= c_{еф} \Phi_y. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Решая систему уравнений (1), получим:

$$E_{вхх} = \frac{\frac{\alpha k_y}{1 + \alpha \beta k_y}}{\frac{\alpha T_y}{1 + \alpha \beta k_y} p + 1} U_{вх}, \quad (2)$$

где

$k_y = \frac{c_{eff} c_{\phi} w_y}{r_y}$ — коэффициент усиления усилителя по обмотке управления w_y ;

$T_y = \frac{c_{\phi} w_y^2}{r_y}$ — постоянная времени обмотки управления w_y ;

$$\alpha = \frac{r_y}{r_y + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}; \quad \beta = \frac{r_2}{r_1 + r_2}.$$

Выражение (2) показывает, что жесткая отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент усиления по напряжению в $\frac{1 + \alpha \beta k_y}{\alpha}$ раз, в это же число раз уменьшается и постоянная времени обмотки управления.

Нестабильность результирующего коэффициента усиления, характеризующая в известной мере нелинейность характеристики усилителя $E_{вых} = f(U_{вх})$ и петлю гистерезиса, для рассматриваемого случая будет:

$$\frac{dK_{рез}}{K_{рез}} = \frac{1}{1 + \alpha \beta k_y} \frac{dk_y}{k_y} + \frac{1}{1 + \alpha \beta k_y} \frac{d\alpha}{\alpha}. \quad (3) *$$

Таким образом, жесткая отрицательная обратная связь по схеме рис. 3 уменьшает неустойчивость результирующего коэффициента усиления в

$$\frac{1}{1 + \alpha \beta k_y}$$

раз, расширяя линейную область характеристики усилителя и сужая петлю гистерезиса.

При использовании для жесткой отрицательной обратной связи отдельной обмотки управления (рис. 4) аналогично предыдущему можно написать уравнения:

$$\left. \begin{aligned} U_{вх} &= r_y i_y + w_y p \Phi_y; \\ E_{вых} &= (r_1 + r_2) i_1 - r_2 i_0; \\ 0 &= (r_0 + r_2) i_0 - r_2 i_1 - w_0 p \Phi_y; \\ \Phi_y &= c_{\phi} (w_y i_y - w_0 i_0); \\ E_{вых} &= c_{eff} \Phi_y. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

*) Коэффициент α может изменяться, например, под влиянием температуры, так как обмотка управления и потенциометр r_1 — r_2 находятся в разных условиях окружающей среды и имеют разные температурные коэффициенты сопротивления.

Решение системы уравнений (4) дает:

$$E_{вых} = \frac{\frac{k_y}{1 + \alpha\beta k_0}}{\frac{T_a}{1 + \alpha\beta k_0} p + 1} U_{вх}, \quad (5)$$

где

$$T_a = \frac{c_\phi \omega_y^2}{r_y} + \alpha \frac{c_\phi \omega_0^2}{r_0} = T_y + \alpha T_0 \text{ — суммарная постоянная времени обмоток возбуждения ЭМУ;}$$

$$\alpha = \frac{r_0}{r_0 + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}.$$

Остальные обозначения те же, что и в предыдущем случае.

Нестабильность результирующего коэффициента усиления для этого случая:

$$\frac{dK_{рез}}{K_{рез}} = \frac{dk_y}{k_y} - \frac{\alpha\beta k_0}{1 + \alpha\beta k_0} \frac{dk_0}{k_0} - \frac{\alpha\beta k_0}{1 + \alpha\beta k_0} \frac{d\alpha}{\alpha}. \quad (6)$$

Полученное выражение показывает, что уменьшение неустойчивости результирующего коэффициента усиления здесь осуществляется лишь за счет разных знаков слагаемых правой части.

Очевидно, что схема по рис. 4 при прочих равных условиях дает большие неустойчивости, чем по рис. 3, и обладает худшими динамическими качествами.

Схема ЭМУ с дифференциальной обратной связью по напряжению показана на рис. 5. Для дифференциальной обратной связи используется дополнительная обмотка управления ω_0 ; начала и концы обмоток управления обозначены буквами h и k .

Для схемы рис. 5 при тех же условиях и допущениях, что и в предыдущих случаях, можно написать систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_{вх} &= r_y i_y - r_y i_0 + w_y p \Phi_y; \\ 0 &= -r_y i_y - w_y p \Phi_y + (r_y + r_0 + r_2) i_0 + r_2 i_1 + w_y p \Phi_y; \\ E_{вых} &= r_2 i_0 + (r_1 + r_2) i_1; \\ \Phi_y &= c_\phi w_y (i_y - i_0) + c_\phi w_0 i_0; \\ E_{вых} &= c_\phi \Phi_y. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

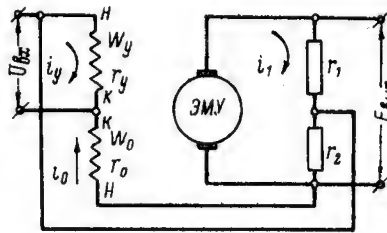


Рис. 5. Схема дифференциальной обратной связи в ЭМУ

Решая эту систему уравнений, получим:

$$E_{вых} = \frac{k_y \left(1 + \alpha \frac{k_0}{k_y}\right)}{\frac{1 + \alpha \beta k_0}{T_a} p + 1} U_{вх}, \quad (8)$$

где обозначения те же, что и в предыдущем случае.

Если выбрать сопротивления потенциометра r_1 — r_2 так, чтобы соблюдалось условие:

$$\beta = \frac{1}{k_y}, \quad (9)$$

то результирующий коэффициент усиления в выражении (8) будет равным k_y , т. е. в этом случае дифференциальная обратная связь не будет снижать коэффициента усиления усилителя.

Нестабильность результирующего коэффициента усиления:

$$\frac{dK_{рез}}{K_{рез}} = \frac{1}{1 + \alpha \frac{k_0}{k_y}} \frac{dk_y}{k_y} + \frac{\alpha k_0 (1 - \beta k_y)}{(1 + \alpha \beta k_0)(k_y + \alpha k_0)} \left(\frac{dk_0}{k_0} + \frac{d\alpha}{\alpha} \right). \quad (10)$$

Если условие (9) соблюдается, то $(1 - \beta k_y) = 0$, и нестабильность будет определяться выражением:

$$\frac{dK_{рез}}{K_{рез}} = \frac{1}{1 + \alpha \beta k_0} \frac{dk_y}{k_y}, \quad (11)$$

т. е. нестабильность коэффициента усиления усилителя с дифференциальной обратной связью будет меньше нестабильности усилителя без обратной связи в $(1 + \alpha \beta k_0)$ раз, а нестабильности k_0 и α не оказывают влияния на результирующую нестабильность. Влияние этих нестабильностей будет мало и при несовсем точном соблюдении условия (9), если величина $\alpha \beta k_0$ будет достаточно велика.

Очевидно, что нелинейность характеристики $E_{вых} = f(U_{вх})$ усилителя и петля гистерезиса будут уменьшаться в то же число раз, в которое уменьшается нестабильность коэффициента усиления.

Настройка дифференциальной обратной связи производится так, чтобы условие (9) соблюдалось при номинальном режиме усилителя (или в середине рабочего диапазона характеристики усилителя). При этом напряжение, снимаемое с потенциометра r_1 — r_2 , уравновешивается напряжением $U_{вх}$ и по обмотке дифференциальной обратной связи ток не проходит. При изменении напряжения на выходе по каким-либо причинам в обмотке w_0 появляется ток такого направления, что напряжение на выходных зажимах восстанавливается до прежней величины с тем большей точностью, чем больше величина $\alpha \beta k_0$. При отклонении режима от номинального в одну сторону регулирующая энергия поступает от источника входного сигнала, при отклонении в другую сторону — от выходной цепи усилителя.

В системах управления с дифференциальной обратной связью при изменении управляющего напряжения $U_{вх}$ переходные процессы протекают весьма интенсивно вследствие того, что в этом случае осуществляется соответствующая временная автоматическая форсировка через обмотку обратной связи. После окончания переходного процесса ток дифференциальной обмотки снижается почти до нуля, в то время как по схеме рис. 4 ток управляющей обмотки, обеспечивающий форсировку, и при установившемся режиме остается

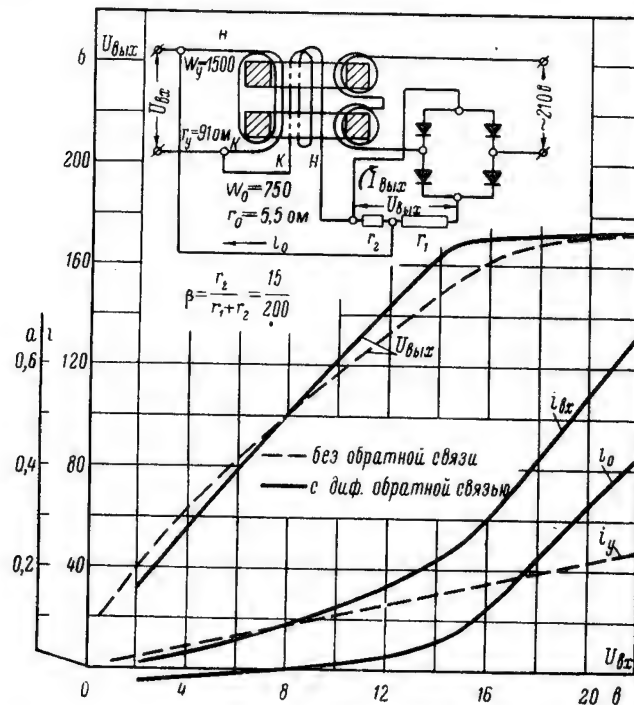


Рис. 6. Статические характеристики МУ с дифференциальной обратной связью

неизменным. В отношении форсировки дифференциальная обратная связь аналогична обычной отрицательной обратной связи по рис. 3, но, в связи с наличием отдельной обмотки для обратной связи, представляет больше возможностей при конструировании систем автоматического управления.

Сравнивая уравнения (2), (5) и (8) и (3), (6) и (11) можно сформулировать основные особенности дифференциальной обратной связи:

- 1) отсутствие снижения коэффициента усиления,
- 2) возможность получения больших форсировок и большей точности регулирования выходной величины, чем по схеме рис. 4.

- 3) большая гибкость схемы по сравнению со схемой рис. 3;
- 4) меньше нестабильности коэффициента усиления и, следовательно, меньшая нелинейность результирующей характеристики усилителя, более узкая петля гистерезиса. Меньшее остаточное напряжение позволяет расширить диапазон изменения выходного напряжения;
- 5) эквивалентная постоянная времени усилителя при дифференциальной обратной связи и при прочих равных условиях больше чем при обычной отрицательной обратной связи по схеме рис. 3 и сравнима с эквивалентной постоянной времени при отрицательной обратной связи по схеме рис. 4.

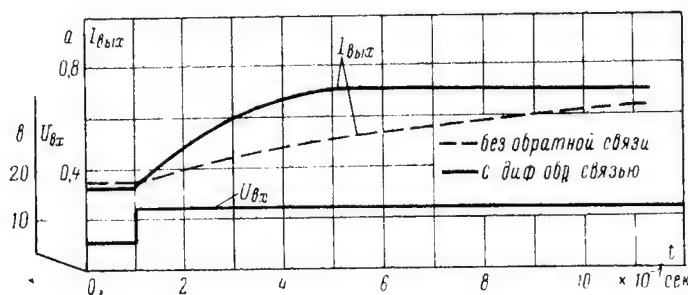


Рис. 7. Переходные процессы в МУ

Полученные выводы, очевидно, могут быть распространены и на магнитные усилители с дифференциальной обратной связью.

На рис. 6 приведены экспериментальные статические характеристики магнитного усилителя без обратной связи и с дифференциальной обратной связью, настроенной в середине рабочего диапазона характеристики (при $U_{вых} = 100$ в). На этом рисунке отчетливо видно изменение направления тока в обмотке дифференциальной обратной связи при переходе через точку настройки.

На рис. 7 показаны кривые изменения тока в переходном режиме, полученные путем осциллографирования процесса при чисто активной нагрузке магнитного усилителя при схеме и ее параметрах, которые показаны на рис. 6.

На рис. 8 для сравнения показаны статические характеристики того же магнитного усилителя при использовании тех же обмоток и при тех же режимах работы, что и в предыдущем случае, но с обычной отрицательной обратной связью по схеме рис. 4. Результирующая статическая характеристика на рис. 8 ничем не отличается от такой же характеристики на рис. 6, но входной ток значительно увеличился.

В отношении статических характеристик и форсировок в переходных режимах сделанные выше выводы будут действительны и для электромашинных усилителей с поперечным полем.

Для электромашинного усилителя с поперечным полем и дифференциальной обратной связью по аналогии с (8) может быть написано:

$$E_{\text{вых}} = \frac{k_y \left(1 + \alpha \frac{k_0}{k_y}\right)}{\frac{T_0 T_2}{1 + \alpha \beta k_0} p^2 + \frac{T_0 + T_2}{1 + \alpha \beta k_0} p + 1} U_{\text{вх}}, \quad (12)$$

где T_2 — постоянная времени поперечной цепи ЭМУ, а остальные обозначения те же, что и в предыдущих формулах.

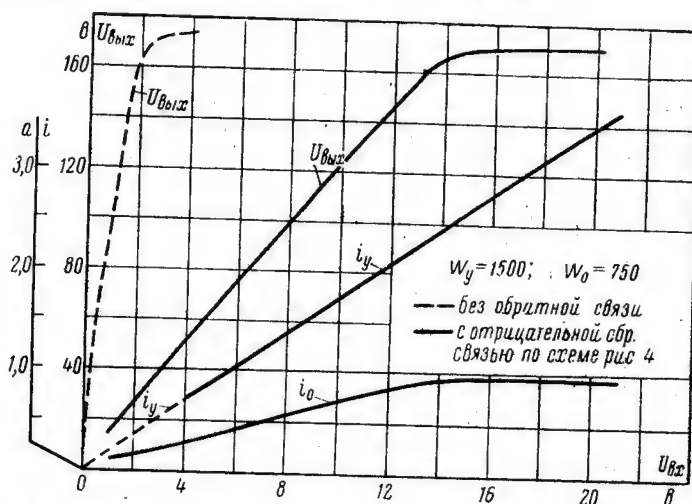


Рис. 8. Статические характеристики МУ с жесткой отрицательной обратной связью

Условие настройки дифференциальной обратной связи (9) должно быть соблюдено и здесь.

Если величина β выбрана меньше, чем соответствует условию (9), то результирующий коэффициент усиления по напряжению возрастает и становится больше k_y , но при этом возрастает входной ток (рис. 9), расширяется петля гистерезиса и затягивается переходный процесс (рис. 10).

Если величина β выбрана больше, чем соответствует условию (9), то результирующий коэффициент усиления по напряжению становится меньше k_y и ток через обмотку обратной связи проходит от выходной цепи усилителя.

На рис. 9 показаны экспериментальные статические характеристики электромашинного усилителя типа ЭМУ-50-3000 без обратной связи и с дифференциальной обратной связью. С целью увеличения коэффициента усиления по напряжению здесь величина $\beta = 0,07$ вместо соответствующей условию (9) $\beta = 0,1$. Вследствие

этого подмагничивающий ток обмотки обратной связи идет от источника входного напряжения и входные токи значительно увеличены.

На рис. 10 изображены осциллограммы переходных процессов без обратной связи и с дифференциальной обратной связью при двух значениях β . На рисунке отчетливо видно увеличение оста-

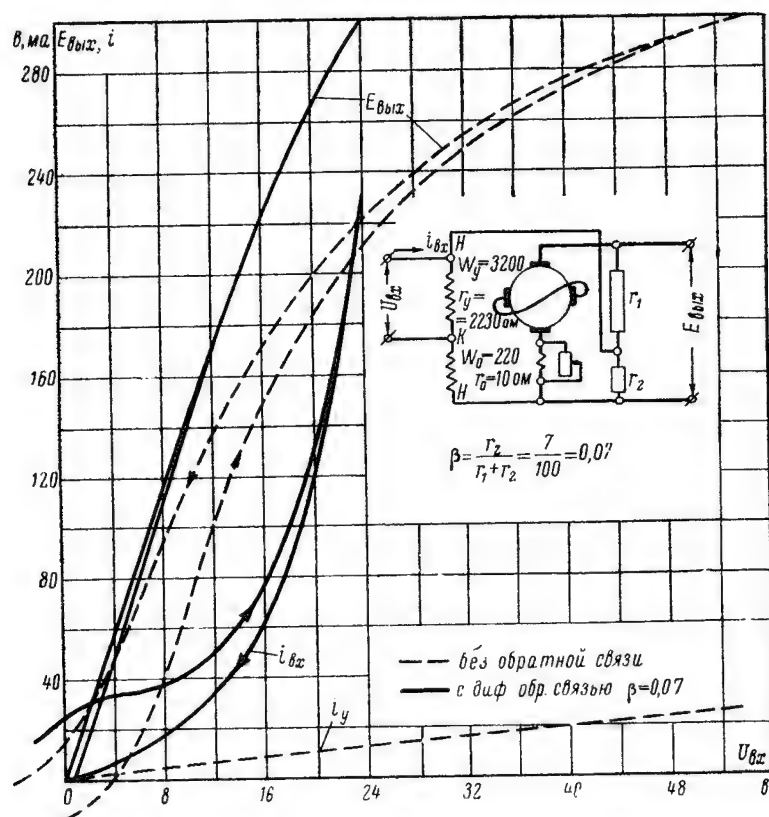


Рис. 9. Статические характеристики ЭМУ с поперечным полем и дифференциальной обратной связью по напряжению

точного напряжения и замедление переходного процесса при уменьшении величины β . Вследствие „просадки“ входного напряжения в начале переходного процесса (при опытах в качестве источника входного напряжения использовалась маломощная анодная батарея) осциллограммы рис. 10 не дают точных количественных зависимостей, однако качественная сторона явления отражена достаточно наглядно.

На рис. 11 показаны осциллограммы переходных процессов в электромашинном усилителе типа ЭМУ-50-3000 без обратной связи и с дифференциальной обратной связью по току, где в каче-

стве нагрузки ЭМУ была включена обмотка возбуждения генератора типа ПН-400. На осциллограмме видна значительная кратковременная форсировка напряжения ЭМУ при дифференциальной обратной связи, вследствие чего выходной ток весьма быстро достигает установившегося значения.

Рассмотренные выше свойства дифференциальной обратной связи на примерах с электромашинными и магнитными усилителями показывают возможность эффективного ее применения во многих случаях практики.

В качестве примера на рис. 12 изображена схема дифференциальной обратной связи для поддержания постоянства скорости по

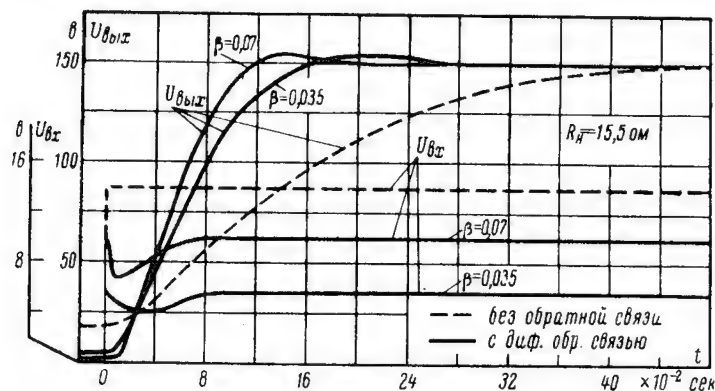


Рис. 10. Переходные процессы в ЭМУ с поперечным полем и дифференциальной обратной связью по напряжению

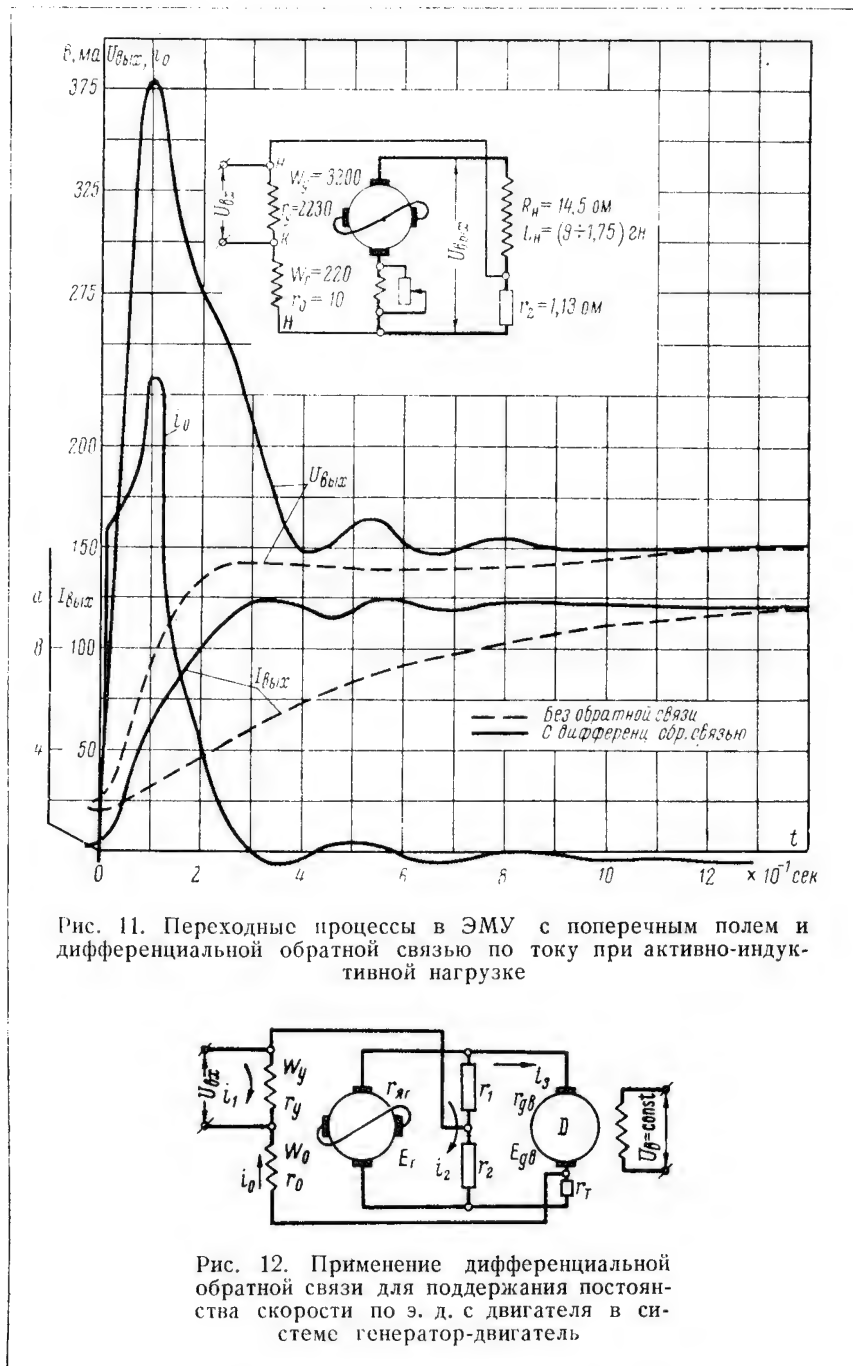
э. д. с. двигателя в системе генератор-двигатель, где в качестве генератора использован электромашинный усилитель с поперечным полем.

В установившемся режиме для системы, схема которой изображена на рис. 12, действительны уравнения равновесия э. д. с.:

$$\begin{aligned} r_y i_1 - r_y i_0 &= U_{ax}; \\ -r_y i_1 + (r_1 + r_y + r_0 + r_{\partial a}) i_0 - r_1 i_1 + r_{\partial a} i_2 + E_{\partial a} &= 0; \\ (r_{a2} + r_{\partial a} + r_m) i_2 + r_{\partial a} i_0 + r_{a2} i_3 + E_{\partial a} &= E_2; \\ -r_1 i_0 + (r_1 + r_2 + r_{a2}) i_3 + r_{a2} i_2 &= E_2; \\ i_y &= i_1 - i_0. \end{aligned}$$

Решая эту систему уравнений и пренебрегая величиной $r_{\partial a}$ по сравнению с величиной r_1 , получим для напряжений на обмотках управления ЭМУ:

$$\begin{aligned} U_0 &= r_0 i_0 = \alpha U_{ax} - R i_2 - \gamma E_{\partial a}, \\ U_y &= U_{ax}, \end{aligned}$$



где

$$\alpha = \frac{r_0}{r_0 + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}},$$

$$R = \frac{r_0 (r_2 r_{\partial\theta} - r_1 r_m)}{r_0 (r_1 + r_2) + r_1 r_2}$$

$$\gamma = \frac{r_0 r_2}{r_0 (r_1 + r_2) + r_1 r_2}.$$

Обозначая величину приращения $E_{\partial\theta}$, не обусловленную напряжением $U_{\partial\theta}$, через $\Delta E_{\partial\theta}$, можно написать:

$$E_{\partial\theta} = k_1 U_y + k_2 U_0 + \Delta E_{\partial\theta}, \quad (13)$$

где

k_1 — коэффициент пропорциональности между $E_{\partial\theta}$ и напряжением на управляющей обмотке w_y ,

k_2 — то же, но между $E_{\partial\theta}$ и напряжением на обмотке w_0 .

Коэффициенты k_1 и k_2 определяются при работе каждой обмотки в отдельности в точке номинального режима работы системы, считая зависимости между соответствующими величинами прямолинейными.

Подставляя в (13) значения U_y и U_0 , получим:

$$E_{\partial\theta} = k_1 \frac{1 + \alpha \frac{k_2}{k_1}}{1 + \gamma k_1 \frac{k_2}{k_1}} U_{\partial\theta} - k_2 \frac{R}{1 + \gamma k_2} i_3 + \frac{\Delta E_{\partial\theta}}{1 + \gamma k_2}. \quad (14)$$

Если настройку системы произвести так, чтобы соблюдались условия:

$$\frac{r_2}{r_1 + r_2} = \frac{1}{k_1}, \quad (15)$$

$$r_m = \frac{r_2}{r_1} r_{\partial\theta}, \quad (16)$$

то $\alpha = \gamma k_1$, и $R = 0$ и выражение (14) можно переписать в виде:

$$E_{\partial\theta} = k_1 U_{\partial\theta} + \frac{\Delta E_{\partial\theta}}{1 + \gamma k_2}. \quad (17)$$

Полученное уравнение (17) показывает, что при соблюдении условий (15) и (16) электродвижущая сила двигателя, а при $\Phi_{\partial\theta} = \text{const}$ и его скорость, практически не будут зависеть от тока нагрузки, всякое изменение э. д. с. (и скорости при $\Phi_{\partial\theta} = \text{const}$), не обусловленное $U_{\partial\theta}$, уменьшается в $(1 + \gamma k_2)$ раз, а результирующий коэффициент усиления системы $K_{\text{рез}} = k_1$.

Применение дифференциальной обратной связи может представлять собою удобный выход из положения в тех, например,

случаях, когда применение обычной жесткой отрицательной обратной связи, связанное с увеличением входного напряжения, не представляется возможным, а применение обратной связи с эталонным напряжением не желательно, так как связано с конструктивным усложнением системы, особенно когда регулируемая величина должна изменяться в широком диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Барышников, Диссертация, ЛЭТИ, 1952.
2. Т. Н. Соколов, Электромеханические системы автоматического регулирования, Госэнергоиздат, 1952.

Поступила в декабре 1955 г.

Ассистент В. А. ОЛЕЙНИКОВ

**ГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ
ИХ РАБОТЫ**

Методы расчета линейных систем регулирования при импульсном режиме их работы разработаны в достаточной мере и широко освещены в литературе [1, 2, 3]. Однако, как известно, большинство элементов систем автоматического регулирования являются нелинейными (магнитные и электромашинные усилители, корректирующие и стабилизирующие цепи и т. д.). Нелинейный характер отдельных элементов особенно проявляется при форсировке процессов за счет значительного увеличения мощности импульсов. В этом случае методы расчета импульсных цепей, основанные на допущении о линейном характере соответствующих зависимостей, не применимы, так как дают весьма неточные результаты. Надо отметить и тот факт, что работа таких элементов, как магнитные, электромашинные усилители и корректирующие цепи, в импульсных режимах мало исследована и совсем не освещена в литературе, хотя системы с этими элементами широко используются в практике и успешно эксплуатируются. По этим причинам автор попытался исследовать работу магнитного усилителя в импульсном режиме питания его обмотки управления, как элемента существенно нелинейного. Исследования проведены графическим методом. Эти методы расчета различных электрических цепей как в статических, так и в динамических режимах широко используются на практике и область их применения непрерывно расширяется [4, 5, 6]. Это обусловлено простотой, наглядностью и достаточной точностью графических методов расчета.

Блок-схема исследуемой установки и ее эквивалентная схема даны на рис. 1 и 2. Вид импульсов напряжения на обмотке управления магнитного усилителя показан на рис. 3. При работе импульсного элемента на индуктивность целесообразно параллельно обмотке ставить разрядное сопротивление. Благодаря разрядному сопротивлению не возникают перенапряжения на обмотке при спадании импульса,

и повышается среднее значение тока в импульсе за счет наличия замкнутого контура. Кроме этого, необходимо отметить существенное влияние переменного тока на обмотку постоянного тока магнитного усилителя. Переменный ток затягивает переходный процесс

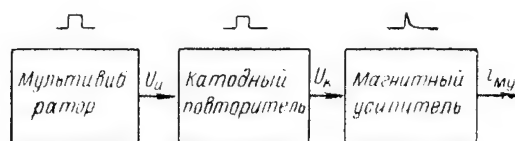


Рис. 1. Блок-схема установки

в этой обмотке, снижает амплитуду импульса тока и при некоторых частотах импульсов вызывает низкочастотные биения. Эти соображения подтверждены рис. 4, где приведены опытные осциллограммы.

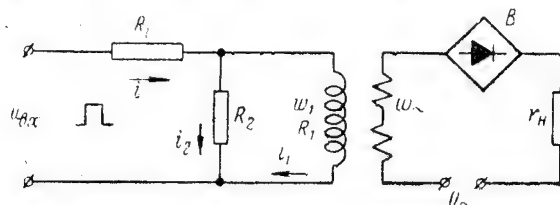


Рис. 2. Эквивалентная схема

R_t — внутреннее сопротивление катодного повторителя; R_1 — сопротивление обмотки управления; w_1 — число витков обмотки управления; R_2 — разрядное сопротивление; B — выпрямитель; $w_~$ — число витков переменного тока; r_H — нагрузка

Отсюда можно сделать вывод, что в импульсной цепи регулирования магнитный усилитель не является звеном направленного

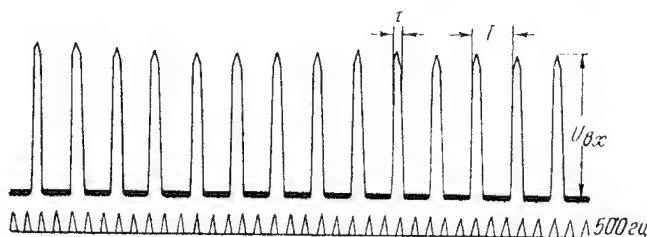


Рис. 3. Импульсы, подаваемые на вход катодного повторителя

T — период; τ — длительность импульса; U_{ay} — амплитуда импульса

действия. Все особенности работы магнитного усилителя в импульсном режиме учитываются графическим методом расчета.

Приведем сначала расчет для случая разомкнутой цепи переменного тока магнитного усилителя. По эквивалентной схеме рис. 2

составляем уравнение для тока в обмотке постоянного тока магнитного усилителя.

$$u_{вх} = iR_i + w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (1)$$

$$u_{вх} = iR_i + i_2 R_2; \quad (2)$$

$$i_2 = i - i_1. \quad (3)$$

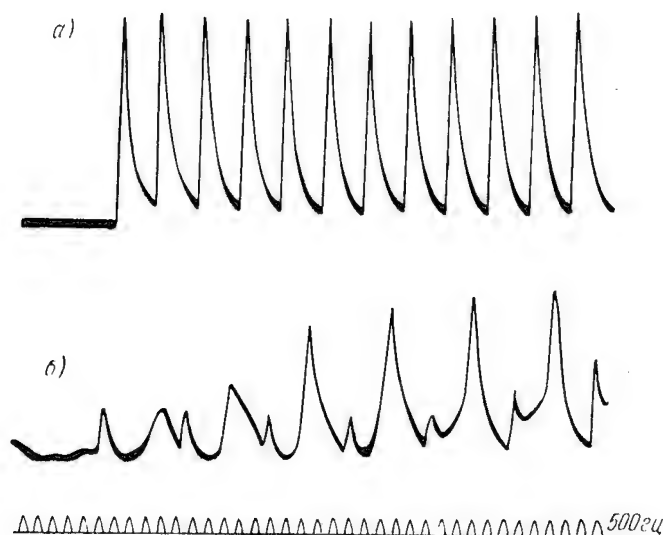


Рис. 4. Опытные осциллограммы

а — вид импульсов и переходный процесс в обмотке управления магнитного усилителя при разомкнутой стороне переменного тока;
б — то же при замкнутой стороне переменного тока

Из (2) и (3) определяем ток i ; подставляя в (1), получим:

$$u_{вх} = \frac{u_{вх} R_i}{R_i + R_2} + i_1 \frac{R_2 R_i}{R_i + R_2} + i_1 R_1 + w_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4)$$

Обозначая

$$\frac{R_2 R_i}{R_i + R_2} = R, \quad \frac{R_i}{R_i + R_2} = \frac{R}{R_2} \text{ и}$$

делая элементарные преобразования, имеем:

$$\frac{u_{вх} (R_2 - R)}{R_2 (R + R_1)} - i_1 = \frac{w_1}{R + R_1} \cdot \frac{d\Phi}{dt}. \quad (5)$$

Умножением левой и правой части уравнения (5) на w_1 перейдем к ампервиткам; выразим поток через индукцию и запишем уравнение в приращениях

$$\frac{\frac{u_{вх} (R_2 - R) w_1}{R_2 (R + R_1)} - i_1 w_1}{s w_1^2} = \frac{\Delta B}{R_1 + R}. \quad (6)$$

Данное уравнение справедливо для построения переходного процесса во время действия импульса. Таким же путем можно вывести уравнение для интервала между импульсами, которое будет иметь вид:

$$\frac{\Delta B}{-i_1 w_1} = \frac{\Delta t}{\frac{s w_1^2}{R_1 + R_2}}. \quad (7)$$

Для построения переходного процесса в обмотке управления магнитного усилителя необходимо иметь кривую намагничивания материала усилителя, снятую на постоянном токе. Данную кривую можно получить из кривой намагничивания, снятой на переменном токе, путем графического построения, предложенного А. В. Башариным [7].

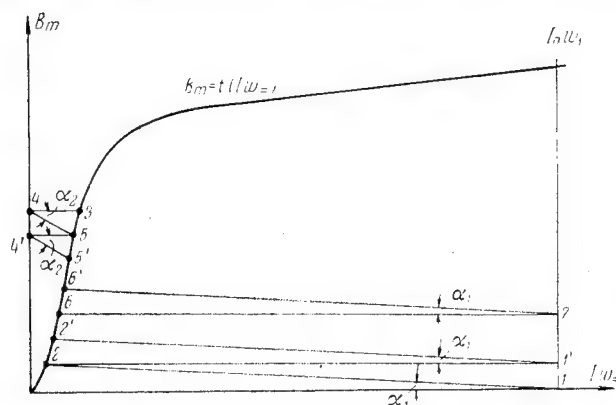


Рис. 5. График зависимости $B_m = f(I w_2)$

Так как методы графического построения переходных процессов обоснованы и опубликованы в литературе, то, не приводя описания его сущности, проведем построение.

Примем, что вторичная цепь магнитного усилителя разомкнута и по формуле (6) проведем построение для времени действия импульса, а по формуле (7) — для интервала между импульсами.

Разбиваем длительность импульса τ на равные промежутки времени Δt . На графике $B_m = f(I w_2)$ (рис. 5) откладываем величину установившейся м. д. с.

$$I_0 w_1 = \frac{u_{av} (R_2 - R) w_1}{R_2 (R + R_1)}$$

и проводим прямую параллельную оси ординат. Из точки 1 под углом

$$\alpha_1 = \arctg \frac{\Delta t m_{Iw} (R_1 + R)}{s w_1^2 m_B},$$

где m_{Iw} и m_B — масштабы м. д. с. и индукции, проводим луч до пересечения с кривой намагничивания в точке 2. Абсцисса точки 2

дает м. д. с., установившуюся за время Δt . Точку 2 сносим на линию $I_0\omega_1$ и получим точку $1'$. Из точки $1'$ проводим опять луч под углом α_1 , до пересечения с кривой намагничивания — точка $2'$. Таким образом ведем построение в течение длительности импульса. В конце построения получим точку 3, которая определит м. д. с., установившуюся в конце импульса.

После прекращения импульса обмотка замыкается на сопротивление R_2 . Теперь ведем построение по формуле (7). Точку 3 сносим на ось ординат в точку 4.

Под углом

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{\Delta t m_{Iw} (R_1 + R_2)}{s \omega_1^2 m_B}$$

проводим луч до пересечения с кривой намагничивания в точке 5. Точку 5 сносим на ось ординат в точке $4'$ и опять под углом α_2 проводим луч до пересечения с кривой намагничивания в точке $5'$. Таким образом ведем построение в интервале между импульсами. При построении в интервале целесообразно увеличить Δt в 2—3 раза. В конце построения получим точку 6, которая определит м. д. с. в конце интервала или в момент начала второго импульса. Построение для второго импульса начинаем с точки 6 и ведем его до установившегося режима.

Теперь проведем построение для случая, когда вторичная цепь магнитного усилителя замкнута через выпрямитель на активное сопротивление. Построение целесообразно вести и для тока на выходе магнитного усилителя. Кроме кривой намагничивания материала сердечника, снятой на постоянном токе, необходимы еще графики $B_m = f(I\omega_\omega)$ при различных ампервитках подмагничивания, $U_{вын} = f(U_{др})$ и $I_{вын} = f(U_{вын})$. Графики $B_m = f(I\omega_\omega)$ для различных ампервитков подмагничивания можно построить из основной кривой намагничивания (7), напряжение на дросселе и напряжение на выпрямителе предполагаем находящимся в квадратуре, т. е. $U^2 = U_{др}^2 + U_{вын}^2$, график $I_{вын} = f(U_{вын})$ при заданном сопротивлении нагрузки можно приближенно представить формулой:

$$I_{вын} = \frac{U_{вын} - U_0 2n}{2nR_{дн} + R_n};$$

U_0 и

$$R_{дн} = \frac{dU_{вын}}{dI_{вын}} = \operatorname{tg} \gamma,$$

находятся из характеристики одной шайбы. В формуле R_n — сопротивление нагрузки, n — число шайб в одном плече. Как видно, для построения переходного процесса в магнитном усилителе требуется только основная кривая намагничивания $B_m = f(I\omega_\omega)$, характеристика одной шайбы выпрямительного моста и параметры системы. Характеристики $B_m = f(I\omega_\omega)$, $U_{вын} = f(U_{др})$ и $I_{вын} = f(U_{вын})$ даны на рис. 6.

Графическим построением можно учесть влияние переменной составляющей индукции в сердечниках магнитного усилителя на переходный процесс. Индукция в сердечнике теперь будет выражаться суммой $B_0 + B_m \sin \omega t$. Если без переменной составляющей

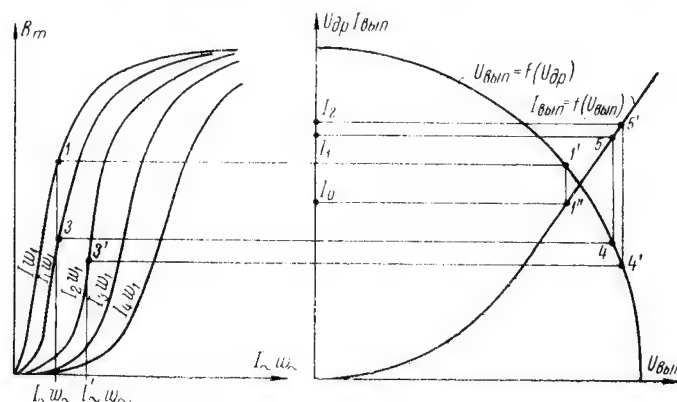


Рис. 6. Характеристики:
 $B_m = f(I_{\sim w_{\sim}})$; $U_{\sim w_{\sim}} = f(U_{\sim w_{\sim}})$; $I_{\sim w_{\sim}} = f(U_{\sim w_{\sim}})$

индукции для создания B_0 требовались ампервитки $I_0 w_1$, то теперь для создания той же индукции требуются ампервитки $I'_0 w_1 < I_0 w_1$.

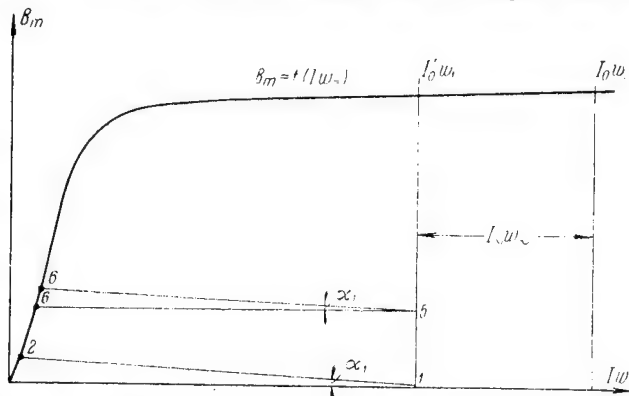


Рис. 7. Графическое построение для учета влияния переменной составляющей индукции в сердечнике МУ на переходный процесс

Графически это учитывается тем, что из установившейся м. д. с. $I_0 w_1$ вычитают м. д. с., созданную переменной составляющей индукции $I_{\sim w_{\sim}}$ (рис. 7). Это равносильно уменьшению угла α_1 . Построение ведется в следующем порядке. На графике $B_m = f(I_{\sim w_{\sim}})$ рис. 7 откладывается величина $I'_0 w_1 = I_0 w_1 - I_{\sim w_{\sim}}$ и проводится прямая параллельная оси ординат. Из точки 1 проводим луч под углом α_1

до пересечения с кривой намагничивания и получаем точку 2. Абсцисса этой точки соответствует м. д. с., установившейся в конце Δt . На графике рис. 6 $B_m = f(I\omega_{\sim})$ находим кривую, соответствующую полученным ампервиткам подмагничивания, и перемещаемся по ней до линии $I_{\sim}\omega_{\sim}$.

Полученную точку 3 сносим на характеристику $U_{вып} = f(U_{др})$ — точка 4, а точку 4 сносим на характеристику $I_{вып} = f(U_{вып})$. Полу-

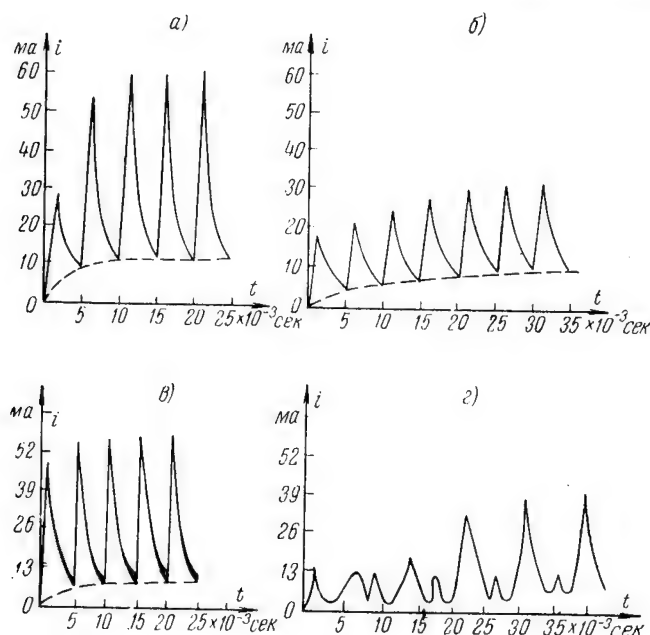


Рис. 8. Опытные осциллограммы и графически построенные переходные процессы

a — расчетный переходный процесс в обмотке управления магнитного усилителя при разомкнутом переменном токе; *б* — то же при работе магнитного усилителя через выпрямитель на активное сопротивление; *в* — экспериментальный переходный процесс в обмотке управления магнитного усилителя при разомкнутом переменном токе; *г* — то же при работе магнитного усилителя через выпрямитель на активную нагрузку

чим новое значение выпрямленного тока — точка 5. На графике $B_m = f(I\omega_{\sim})$ проводим прямую $I'_{\sim}\omega_{\sim}$, соответствующую новому значению тока.

Таким образом проводим построение для времени τ . Построение в интервале между импульсами ничем не отличается от предыдущего и не приводится. В конце интервала получим точку 6 и дальнейшее построение ведем от этой точки.

В качестве примера был произведен расчет и сняты опытные осциллограммы для однотактного магнитного усилителя. Магнитный усилитель выполнен на тороидальных сердечниках из стали ХВП.

Основные его данные следующие:

$$\omega_{\sim} = 276, \quad \omega_1 = 800, \quad R_1 = 150 \text{ ом}, \quad R_2 = 1000 \text{ ом}, \quad s = 2,2 \text{ см.}$$

Импульсы имеют следующие параметры: период $T = 0,005$ сек., длительность $\tau = 1,33 \cdot 10^{-3}$ сек., $\Delta t = 0,1 \cdot 10^{-3}$ сек.

Основные значения расчетных параметров

$$I_0 \omega_1 = 424,4, \quad \alpha_1 = 0,0056^\circ, \quad \alpha_2 = 0,02^\circ.$$

Опытные осциллограммы и графически построенные переходные процессы даны на рис. 8. Из сопоставления данных видно, что графический метод с достаточной точностью позволяет рассчитывать переходные процессы в нелинейных импульсных цепях.

Разница между теоретически построенным процессом рис. 8,б и опытной осциллограммой рис. 8,г объясняется наличием четных гармоник в обмотке постоянного тока магнитного усилителя, которые складываются с импульсами тока и искажают последние. Четными же гармониками объясняется и возникновение на некоторых частотах импульсов низкочастотных биений.

Выводы

1. Графический метод расчета нелинейных систем при импульсном режиме их работы достаточно прост, нагляден и состоит из ряда повторяющихся построений.

2. Графический метод дает возможность получить переходный процесс в любом звене и в любой его точке и тем самым судить о том, как данное звено влияет на всю систему.

3. Метод обеспечивает достаточную точность, которая зависит от точности снятия характеристик, соответствия расчетных параметров истинным и от выбора интервала времени.

4. Для расчета графическим методом требуется самое минимальное число опытных параметров. Для магнитного усилителя с выходом на постоянном токе требуется лишь кривая намагничивания, снятая на переменном токе и характеристика одной шайбы выпрямительного моста.

ЛИТЕРАТУРА

1. З. Я. Ципкин, Переходные и установившиеся процессы в импульсных цепях, Госэнергоиздат, 1951.

2. Основы автоматического регулирования, Под редакцией д.т.н. проф. Солодовникова В. В., Машгиз, 1954.

3. А. А. Меерович, Л. Г. Зеличенко, Импульсная техника, „Советское радио“, 1953.

4. Р. Л. Аронов, Автоматическое управление электроприводами, ОНТИ НКТП СССР, 1935.

5. Е. П. Попов, Динамика систем автоматического регулирования, ГИТТЛ, 1954.

6. А. В. Башарин, Графический метод расчета переходных процессов в автоматизированном электроприводе, Издательство Ленинградского университета, 1956.

Поступила в январе 1957 г.

Докт. техн. наук, проф. П. И. САЙДОВ

УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ СИЛОВЫХ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ СТАБИЛИЗАТОРОВ

1. Уравнения движения

В 1927 году советскому приборостроителю С. А. Ноздровскому было выдано авторское свидетельство на силовой гироскопический стабилизатор. Особенность этого стабилизатора состояла в том, что он был построен на силовых гироскопах (гирорамах).

Силовой гироскоп представляет собой гироскоп с тремя степенями свободы, сцепленный с двигателем, с которым он образует замкнутую систему автоматического регулирования. Наличие указанного двигателя обеспечивает стабилизирующее действие гироскопа при сколь угодно длительном и одностороннем внешнем на него воздействии.

Обычно силовой гироскоп представляет сочетание гироскопа с электрическим разгоном, электрического датчика сигналов, электрического усилителя и стабилизирующего электродвигателя.

Иногда в силовых гироскопах предусматривают электрические дифференцирующие контуры, электрические преобразователи сигналов и корректирующие электродвигатели или электромагниты.

Таким образом, силовые гироскопы являются примером наиболее современных электрогироскопов, где электричество используется не только для разгона гироскопа, но и для его разгрузки, коррекции, демпфирования и т. д.

Гироскопические стабилизаторы, построенные на принципе силовых гироскопов, предназначены для обеспечения устойчивости того или иного объекта относительно одной, двух или всех трех его осей вращения. В соответствии с этим различают одноосные, двухосные и трехосные силовые гиростабилизаторы, причем последние являются наиболее сложными из них.

Если составить дифференциальные уравнения движения трехосного гиростабилизатора, то из них, как частные случаи, можно

получить уравнения движения двухосного и одноосного гиростабилизаторов. Эти наиболее общие дифференциальные уравнения движения трехосного силового гироскопического стабилизатора, работающего в режиме рассогласования его осей подвеса с осями стабилизации, имеют следующий вид [1]:

$$\left. \begin{aligned} A_n(\alpha, \beta, \gamma) \alpha''_n + B_n(\alpha, \beta, \gamma) \alpha''_{n+1} + H\beta'_n + h\alpha'_n &= Q_{\alpha n}, \\ I\beta''_n - H\alpha'_n - k\alpha_n &= 0, \\ T_y U'_{yn} + U_{yn} &= k_y U_n, \\ U_n &= s\beta_n, \quad (\text{где } n = 1 \div 3), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

причем

$$\left. \begin{aligned} Q_{\alpha_1} &= -m(U_{y_1} \cos \beta \cos \gamma - U_{y_2} \sin \gamma \cos \alpha), \\ Q_{\alpha_2} &= -m(U_{y_1} \cos \beta \sin \gamma + U_{y_2} \cos \alpha \cos \gamma), \\ Q_{\alpha_3} &= -m(U_{y_3} + U_{y_1} \sin \beta + U_{y_2} \sin \alpha). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) обозначено:

α_n и β_n — углы поворота гироскопов и гироскопов трехосного гиростабилизатора;

A_n — моменты инерции гироскопов относительно их осей стабилизации;

B_n — центробежные моменты инерции гироскопов;

I — экваториальный момент инерции каждого гироскопа относительно его оси прецессии;

H — кинетический момент гироскопа;

m — крутизна статической характеристики стабилизирующего двигателя по напряжению;

k — крутизна статической характеристики корректирующего двигателя по углу поворота стабилизатора;

h — коэффициент вязкого трения в осях стабилизации, вычисленный с учетом потерь в стабилизирующем электродвигателе;

U_n — напряжения, снимаемые с датчиков сигналов стабилизации;

s — крутизна сигнала по углу прецессии гироскопа;

U_{yn} — напряжения на выходе усилителей, включенных между датчиком сигналов и стабилизирующими электродвигателями;

k_y, T_y — коэффициент усиления и постоянная времени каждого из трех усилителей;

α, β, γ — углы рассогласования осей стабилизации и осей подвеса трехосного стабилизатора.

Устойчивость движения силового гиростабилизатора рассмотрим для двух режимов его возможной работы: когда углы α, β, γ настолько малы, что ими можно пренебречь и когда указанными углами нельзя пренебрегать. Можно показать, что при $\alpha = \beta = \gamma = 0$

имеет место $A_n = \text{const}$, $B_n = 0$ и, следовательно, система дифференциальных уравнений (1) распадается на три независимых между собой системы уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} A\alpha'' + h\alpha' + H\beta' + mU_y &= 0, \\ I\beta'' - H\alpha' - k\alpha &= 0, \\ T_y U_y' + U_y &= k_y U, \\ U &= s\beta. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2. Частотный метод исследования устойчивости

Для исследования устойчивости движения, описываемого уравнениями (3) воспользуемся частотным методом.

В символической форме система (3) может быть переписана в виде:

$$\left. \begin{aligned} (AD^2 + hD)\alpha + HD\beta + mU_y &= 0, \\ -(HD + k)\alpha + ID^2\beta &= 0, \\ -k_1\beta + (T_y D + 1)U_y &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $k_1 = sk_y$.

В матричной форме система (4) представится в виде:

$$\begin{vmatrix} AD^2 + hD & HD & m \\ -(HD + k) & ID^2 & 0 \\ 0 & -k_1 & T_y D + 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \alpha \\ \beta \\ U_y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (5)$$

Введем матрицы:

$$\begin{aligned} g_1(D) &= \begin{vmatrix} AD^2 + hD, & HD \\ -(HD + k), & ID^2 \end{vmatrix}_{(2 \times 2)}, \\ g_2(D) &= \| T_y D + 1 \|_{(1 \times 1)}, \\ l_1(D) &= \begin{vmatrix} m \\ 0 \end{vmatrix}_{(2 \times 1)}, & l_2(D) &= \| 0, -k_1 \|_{(1 \times 2)}, \\ y_1(D) &= \begin{vmatrix} \alpha \\ \beta \end{vmatrix}_{(2 \times 1)}, & y_2(D) &= \| V_y \|_{(1 \times 1)}. \end{aligned}$$

Тогда матричная система (5) преобразуется к виду:

$$\left. \begin{aligned} g_1(D)y_1 - l_1(D)y_2 &= 0, \\ l_2(D)y_2 + g_2(D)y_2 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

т. е. к системе уравнений замкнутой двухзвенной цепи автоматического регулирования (рис. 1).

Если через $\varphi_1(D)$ и $\varphi_2(D)$ обозначить передаточные функции звеньев, т. е. отношение изображений функций на выходе звеньев

к функциям на их выходе, то на основании (6) можно написать:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1(D) &= g_1^{-1}(D) l_1(D), \\ \varphi_2(D) &= g_2^{-1}(D) l_2(D). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Передаточная функция всей системы, равная произведению передаточных функций звеньев, при размыкании ее цепи на выходе второго звена, будет:

$$k(D) = \varphi_2(D) \varphi_1(D). \quad (8)$$

Подставляя в (8) выражения для $\varphi_1(D)$ и $\varphi_2(D)$, получим

$$k(D) = \frac{-Hmk_1 D}{D(T_y D + 1)(AID^3 + hID^2 + H^2 D + kH)}. \quad (9)$$

Заменяя в (9) D на $j\omega$, где $j = \sqrt{-1}$, получим выражение для амплитудно-фазовой характеристики гироскопа с усилителем в виде

$$k(j\omega) = \frac{-Hmk_1}{AIT_y\omega^4 - hI\omega^3 + kH - H^2T_y\omega^2 + j\omega(-T_yhI\omega^2 + kHT_y - AI\omega^2 + H^2)}. \quad (10)$$

Известно, чтобы система была устойчива, ее амплитудно-фазовая характеристика $k(j\omega)$ не должна охватывать точку $A(-1, j0)$ комплексной плоскости при изменении ω от 0 до ∞ . Следовательно, в нашем случае рассматриваемый прибор будет устойчив, если для всех трех его гироскопов будут выполняться условия:

$$\left. \begin{aligned} -\operatorname{Re}[K_n(j\omega)] &< 1, \\ I_m[K_n(j\omega)] &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где $n = 1, 2, 3$.

В противном случае прибор будет неустойчив.

Основное достоинство частотного критерия устойчивости состоит в том, что амплитудно-фазовая характеристика, о которой здесь шла речь, может быть определена экспериментально при подаче на вход разомкнутой системы «Гироскопа-усилитель» синусоидального сигнала, переменной частоты. Размыкание указанной системы обычно производится на практике на выходе усилителя. Для изменения напряжения

Рис. 1. Структурная схема гироскопа с усилителем

I звено — гироскоп;
II звено — усилитель.

выхода по частоте обычно используется сельсин, работающий в трансформаторном режиме, ротор которого вращается с различными угловыми скоростями.

3. Критерий устойчивости Берендеева-Синджа

В общем случае дифференциальные уравнения движения трехосного гироскопического стабилизатора являются уравнениями с переменными коэффициентами, имеющими к тому же высокий порядок.

При исследовании устойчивости прецессионного движения подобных гиросtabilизаторов, когда допустимо пренебречь инерционными членами их уравнений движения, можно воспользоваться методами К. П. Персидского, Н. Г. Четаева и других авторов.

Использование указанных методов становится практически невозможным, когда необходимо ответить на вопрос об устойчивости не только прецессионного, но и нутационного движения гиросtabilизатора, когда нельзя пренебречь инерционными членами уравнений движения, которые содержат к тому же переменные инерционные коэффициенты.

Для решения этой общей задачи устойчивости гиросtabilизатора представляется целесообразным дополнить исследования устойчивости его прецессионного движения критерием А. В. Берендеева-Дж. Синджа, который позволяет учесть влияние инерционности системы на ее устойчивость.

Сущность критерия устойчивости движения Берендеева-Синджа состоит в следующем.

Положим, что рассматриваемая система двигалась равномерно в результате равновесия, достигнутого между внешними, внутренними силами и реакциями связей. Пусть в некоторое мгновение времени возникло «возмущение» в форме воздействия на систему новых внешних сил, изменения параметров связей или масс отдельных точек. В результате возникновения возмущения изменится движение точки-образа в пространстве конфигураций.

Если под влиянием возмущений изменится значение инерционных коэффициентов во времени, то точка-образ изменит скорость и ускорение, но не изменит своей траектории. При варьировании инерционных коэффициентов, т. е. при изменении их функциональной зависимости вследствие возмущений, — изменится форма траектории точки-образа в пространстве конфигураций.

Вектор бесконечно малого смещения, соединяющий соответствующие точки траекторий невозмущенного и возмущенного движения точки-образа Дж. Синдж назвал вектором возмущения. При этом особое значение представляют два способа задания соответствия между точками траектории: изохронное соответствие и соответствие по нормали. Если с течением времени этот вектор неограниченно возрастает, то движение неустойчиво; наоборот, движение будет устойчивым, если указанный вектор неограниченно убывает, стремясь при этом к нулю или к некоторому конечному пределу.

При исследовании устойчивости по Синджу необходимо рассмотреть бесконечное множество траекторий, образующих двумерное пространство V_2 .

Очевидно, что уравнения этих траекторий имеют вид

$$x^i = x^i(\sigma, \tau), \quad (12)$$

где

σ — параметр, изменяющийся вдоль каждой траектории;
 τ — постоянный параметр для всех точек данной траектории.

Соответственными точками траекторий называются такие точки, которые получаются при одном и том же значении параметров. Сказанное поясним рис. 2.

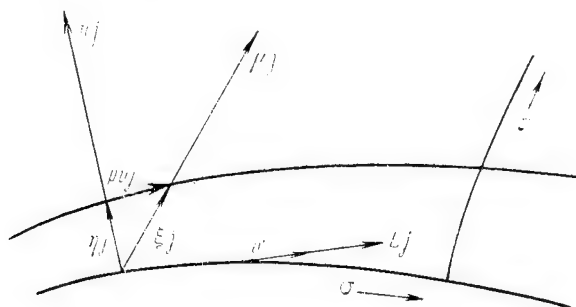


Рис. 2. Траектория невозмущенного и возмущенного движения

Если H^j — векторное поле на поверхности V_2 то:

$$\frac{\delta^2 H^i}{\delta \sigma \delta \tau} - \frac{\delta^2 H^i}{\delta \tau \delta \sigma} = R_{klm}^j H^k \frac{\partial x^l}{\partial \sigma} \frac{\partial x^m}{\partial \tau}, \quad (13)$$

где

$$R_{klm}^j = \frac{\partial \Gamma_{kl}^j}{\partial x^m} + \Gamma_{kl}^n \Gamma_{nm}^j - \frac{\partial \Gamma_{kl}^j}{\partial x^m} \Gamma_{nm}^j.$$

Полагая

$$H^j = \frac{\delta x^j}{\delta \sigma}$$

и принимая во внимание, что

$$\frac{\delta^2 x^j}{\delta \sigma \delta \tau} = \frac{\delta^2 x^j}{\delta \tau \delta \sigma},$$

будем иметь в силу (13)

$$\frac{\delta^2}{\delta \sigma^2} \frac{\partial x^j}{\partial \tau} - \frac{\delta}{\delta \tau} \cdot \frac{\delta^2 x^j}{\delta \sigma^2} + R_{klm}^j \frac{\partial x^k}{\partial \sigma} \frac{\partial x^l}{\partial \tau} \frac{\partial x^m}{\partial \sigma} = 0. \quad (14)$$

Введем вектор

$$\varepsilon^j = \frac{\partial x^j}{\partial \tau} d\tau. \quad (15)$$

Вектор ε^j — вектор бесконечно малого смещения, соединяющий точку (σ, τ) одной траектории с соответствующей точкой $(\sigma, \tau + d\tau)$ близкой траектории.

Равенства (14) могут быть теперь записаны так:

$$\frac{\delta^2 \varepsilon^j}{\delta \sigma^2} + R_{klm}^j \frac{\partial x^k}{\partial \sigma} \varepsilon^l \frac{\partial x^m}{\partial \sigma} = d\tau \frac{\delta}{\delta \tau} \frac{\delta^2 x^j}{\delta \sigma^2}. \quad (16)$$

Имея в виду „изохронное соответствие“, положим $\sigma = t$, тогда можем написать:

$$\frac{\partial x^k}{\partial \sigma} = v^k = v L^k, \quad (17)$$

где L^k — единичный вектор касательной к траектории. Далее, имеем

$$\frac{\delta^2 x^k}{\delta \sigma^2} = \frac{\delta^2 x^k}{\delta t^2} = X^k. \quad (18)$$

Теперь уравнения (16) могут быть переписаны в виде:

$$\frac{\delta^2 \varepsilon^j}{\delta t^2} + v^2 R_{klm}^j L^k \varepsilon^l L^m = X_k^j \varepsilon^k, \quad (19)$$

так как известно, что

$$X^k = X^j \frac{\partial x^k}{\partial x^j}. \quad (20)$$

Отсюда

$$d\tau \frac{\delta}{\delta \tau} \frac{\delta^2 x^j}{\delta \sigma^2} = d\tau \frac{\delta}{\delta \tau} \left(X^j \frac{\partial x^k}{\partial x^j} \right) = \frac{\delta x^k}{\delta \tau} d\tau \frac{\partial X^j}{\partial x^j} = X_k^j \varepsilon^k.$$

Здесь

X_k^j — ковариантная производная вектора обобщенных сил X^j .

Введем в рассмотрение выражение для модуля вектора смещения

$$\varepsilon = (\varepsilon_j \varepsilon^j)^{\frac{1}{2}}.$$

Пусть

$$\varepsilon^j = \varepsilon \mu^j,$$

где

μ^j — единичный вектор направления вектора ε^j , причем $\mu_j \mu^j = 1$.

Тогда уравнения (19) перепишутся в виде

$$\mu^j \frac{\delta^2 \varepsilon}{\delta t^2} + v^2 R_{klm}^j L^k \mu^l L^m = X_k^j \varepsilon \mu^k. \quad (21)$$

Переходя к полным дифференциалам, получим

$$\frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \varepsilon \left(v^2 R_{jklm} \mu^j L^k \mu^l L^m - X_{jk} \mu^j \mu^k - \frac{\delta \mu^j}{\delta t} \frac{\delta \mu^j}{\delta t} \right) = 0$$

или окончательно получим

$$\frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \varepsilon \left(k - \frac{\delta \mu^j}{\delta t} \frac{\delta \mu^j}{\delta t} \right) = 0, \quad (22)$$

где

$$k = v^2 R_{jklm} \mu^j L^k \mu^l L^m - X_{jk} \mu^j \mu^k, \quad (23)$$

Здесь величина k представляет собой риманову кривизну для элементарной площадки, определяемой векторами ε^j и L^j (см. рис. 2), т. е. представляет скалярную величину, по знаку которой можно судить об устойчивости движения.

Если k положительно, то установившееся движение устойчиво, а если k отрицательно — движение неустойчиво. Проанализируем величины, входящие в (23). Еод величиной $v = \frac{\partial x^k}{\partial \tau}$ следует в нашем случае понимать скорость изменения инерционных коэффициентов с одинаковыми индексами, а в общем случае — скорость изменения обобщенных координат, взятых с одинаковыми индексами. Поэтому можем составить выражения

$$vL^k = \frac{dA_{kk}}{dt}, \quad vL^m = \frac{dA_{mm}}{dt}. \quad (24)$$

Отсюда

$$v^2 L^k L^m = \frac{dA_{kk}}{dt} \cdot \frac{dA_{mm}}{dt}. \quad (25)$$

Величина

$$R_{j,l,m} v^j = R_{klm}^j,$$

известная как тензор кривизны, в нашем случае не равна нулю только при значениях $k = m$, как частный случай, при $j = k = l = m$. Величина же

$$R_{klk}^j = -\frac{\partial \Gamma_{kk}^j}{\partial A_{ll}},$$

или, в частном случае

$$R_{jjj}^j = -\frac{1}{2A_{jj}^2}.$$

Величина Γ_{kk}^j , на основании формул ковариантного дифференцирования, может быть найдена по формуле

$$\Gamma_{kk}^j = -g_k^j \frac{1}{2A_{kk}}. \quad (26)$$

Таким образом, в общем случае, имеем

$$R_{klk}^j = \frac{\partial}{\partial A_{ll}} \left(\frac{g_k^j}{2A_{kk}} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial A_{ll}} \left(\frac{g_k^j}{A_{kk}} \right).$$

Величина $X_k^j = X_{jk} v^j$ — ковариантная производная вектора обобщенных сил X^j по координате. Ее можно представить в виде:

$$X_k^j = \frac{\partial X^j}{\partial A_{kk}} + \Gamma_{kl}^j X^l.$$

В этом выражении $\Gamma_{kl}^j \neq 0$ только при $k = l$, и, следовательно, имеем

$$\Gamma_{kk}^j = -g_k^j \frac{1}{2A_{kk}},$$

$$X^k = \frac{\partial^2 x^k}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 A_{kk}}{\partial t^2}.$$

Так как у нас $k=l$, то следует, что $j=k$. В противном случае тензор кривизны обратился бы в нуль и мы перешли бы к эвклидову, а не риманову пространству. Считая поэтому, что для нашего случая имеет место равенство $j=k=l=m$, можем написать

$$R_{kkk}^k = \frac{1}{2A_{kk}^2}, \quad I_{kk}^k = -\frac{1}{2A_{kk}}.$$

Ввиду ортогональности векторов j и k , можно принять $X^j = X^k$; тогда будем иметь:

$$\frac{\partial X^j}{\partial A_{kk}} = \frac{\partial}{\partial A_{kk}} \left(\frac{\partial^2 A_{kk}}{\partial t^2} \right) g^j - g_{kk}^j \frac{1}{2A_{kk}} \frac{\partial^3 A_{kk}}{\partial t^3}.$$

Следовательно, выражение для римановой кривизны переписется в нашем случае в виде

$$k = \frac{dA_{kk}}{dt} \frac{dA_{kk}}{dt} \cdot \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial A_{kk}} \left(\frac{g_{kk}}{A_{kk}} \right) - \frac{\partial}{\partial A_{kk}} \left(\frac{\partial^2 A_{kk}}{\partial t^2} \right) + g_{kk} \frac{1}{2A_{kk}} \frac{\partial^3 A_{kk}}{\partial t^3}.$$

Наконец, принимая во внимание, что $j=k=l=m$, окончательно получим

$$k = \frac{1}{2} \left(\frac{dA_{kk}}{dt} \right)^2 \frac{1}{A_{kk}^2} + \frac{1}{2} \frac{1}{A_{kk}} \frac{d^2 A_{kk}}{dt^2} - \frac{d}{dA_{kk}} \left(\frac{\partial^2 A_{kk}}{\partial t^2} \right). \quad (27)$$

По знаку k , как уже отмечалось, можно судить об устойчивости движения системы.

Этот метод исследования устойчивости движения назван нами критерием устойчивости Берендеева—Синджа потому, что координаты в уравнении вектора возмущения, введенного Синджем, взяты по А. В. Берендееву в виде инерционных коэффициентов [2].

Столь удачный выбор обобщенных координат, закон изменения которых в случае гиросистем практически всегда наперед задан, дает возможность использовать этот критерий.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. И. Сайдов, Диссертация, ЛЭТИ, 1955.
2. А. В. Берендеев, Диссертация, ЛЭТИ, 1947.

Поступила в марте 1955 г.

*Канд. техн. наук, доц. Л. И. БАЙДА,
канд. техн. наук, доц. Г. В. ОДИНЦОВ, инж. С. С. РЫБАК*

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПЕРЕМЕННЫЙ ПРИ ПОМОЩИ КОНТАКТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С БЕЗЫСКРОВОЙ КОММУТАЦИЕЙ

Преобразование постоянного тока в переменный имеет существенное значение для многих областей техники, в том числе для автоматики и телемеханики, контрольно-измерительной техники, радиотехники и др. Подобное преобразование осуществляется в настоящее время различными способами. Целесообразность использования того или иного способа преобразования определяется в каждом отдельном случае условиями работы преобразователя.

Существующие преобразователи постоянного тока в переменный могут быть разделены на следующие основные группы: а) вибрационные, б) электромашинные, в) ионные.

Преобразователи вибрационного типа обычно применяются для питания переносной контрольно-измерительной и радиотехнической аппаратуры при напряжениях постоянного тока от 6 до 110 в и мощностях до 100 вт.

Достоинствами этих преобразователей являются: простота конструкции, малые габаритные размеры и отсутствие необходимости непрерывного наблюдения и обслуживания в процессе работы. Срок службы около 100 час. Коэффициент полезного действия 45—80%.

Основными недостатками вибропреобразователей следует считать: относительно малые мощности и низкие преобразуемые напряжения, искрение на контактах, затруднительность получения переменного напряжения повышенной частоты (400—800 гц), электрические помехи, создаваемые вибратором, снижение надежности и качества работы преобразователя при колебаниях напряжения постоянного тока и сопротивления нагрузки.

Широко применяющиеся в настоящее время электромашинные преобразователи обычно состоят из двух машин. В качестве приводного двигателя используется машина постоянного тока с параллельным или независимым возбуждением, генератором же является обычная синхронная машина.

Электромашинные преобразователи, по сравнению с вибропреобразователями, позволяют значительно увеличить напряжения постоянного и переменного тока, а соответственно и мощность на выходе преобразователя. Такие преобразователи весьма надежны в эксплуатации, но, вместе с тем, обладают и рядом существенных недостатков, вызывающих во многих случаях отказ от их применения.

Прежде всего следует указать на зависимость частоты переменного тока от напряжения сети постоянного тока, поскольку число оборотов приводного двигателя пропорционально этому напряжению. Отрицательным фактором является также и значительные габариты и веса таких преобразователей. Если для стабилизации частоты генератора применяются искусственные меры, то габариты и веса установки еще более увеличиваются.

Ионные преобразователи делаются на самые различные мощности от десятков ватт до многих мегаватт. Применение их весьма разнообразно, например: в системах передачи энергии постоянным током, для регулирования скорости синхронных двигателей, в технике промышленного использования токов высокой частоты, для питания аппаратуры связи, автоматики и телемеханики и т. п.

Ионные преобразователи не имеют движущихся и контактирующих элементов в основных цепях, практически бесшумны, допускают возможность получения переменного тока повышенной частоты (примерно до 1000 гц), позволяют, в случае необходимости, осуществлять регулирование частоты в широком диапазоне. К недостаткам их можно отнести: низкий к. п. д. ($30 \div 40 \%$) при напряжениях постоянного тока 110—220 в, относительную сложность осуществления питания цепей накала и необходимость стабилизации напряжения в этих цепях, сравнительно большие габаритные размеры и вес, особенно при низких преобразуемых напряжениях.

Срок службы ионных вентилях около 1000 час. Преобразователи этого типа практически целесообразно использовать при напряжении постоянного тока не ниже 100 в.

Для питания контрольно-измерительной и радиотехнической аппаратуры, а также устройств автоматики и телемеханики наибольший интерес представляют преобразователи мощностью от долей киловатта до нескольких киловатт при напряжениях постоянного тока 110—220 в.

В ряде случаев первостепенное значение имеют габаритные размеры, форма кривой напряжения переменного тока, малые акустические шумы, создаваемые установкой, возможность нормальной работы в условиях значительных изменений напряжения постоянного тока и сопротивления нагрузки.

Для указанных мощностей и напряжений преобразователи вибрационного типа не могут быть использованы, а электромашинные и ионные преобразователи обладают существенными недостатками, которые, как уже упоминалось, часто препятствуют возможности их применения.

В лаборатории автоматики и телемеханики Ленинградского электротехнического института имени В. И. Ульянова (Ленина) был разработан новый тип преобразователя, который обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими. Принцип действия

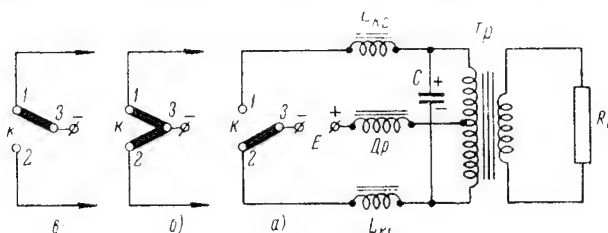


Рис. 1.

этого преобразователя заключается в следующем: с помощью механических контактов периодически изменяется направление постоянного тока в первичной обмотке выходного трансформатора. Размыкание контактов производится при значениях тока, близких к нулю, что достигается включением последовательно с контактами дросселей с прямоугольной характеристикой намагничивания и использованием специального коммутирующего конденсатора. Вследствие

этого разрыв цепи происходит без искрения. Таким образом, разработанный преобразователь может быть назван контактным преобразователем с безыскровой коммутацией. Принципиальная схема его изображена на рис. 1.

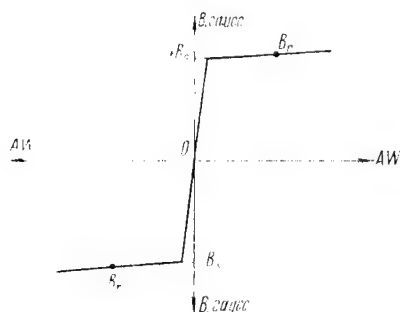


Рис. 2.

Периодическое переключение контактов переключателя K производится вспомогательным мало-мощным приводом, устройство которого будет рассмотрено ниже.

Конструктивно переключатель выполнен таким образом, что переходу подвижного контакта

с его из одного крайнего положения в другое (a и b на рис. 1) предшествует кратковременное перекрытие контактов (положение b на рис. 1).

Сердечники дросселей L_{k1} и L_{k2} выполнены из материала, кривая намагничивания которого близка к прямоугольной (рис. 2).

Рассмотрим работу схемы. Пусть переключатель находится в положении a . Постоянный ток от источника питания протекает по нижней полуобмотке выходного трансформатора T_p . Конденсатор C заряжен до напряжения, которое в силу резонансных явлений значительно (в 2—3 раза) превышает напряжение E и имеет

полярность, показанную на схеме, дроссель L_{k1} насыщен и сопротивление его пренебрежимо мало.

Время нахождения контактов в каждом из крайних положений соответствует одному полупериоду переменного тока. Как уже отмечалось, в момент, предшествующий переключению, происходит перекрытие контактов. При этом конденсатор C разряжается на оба дросселя L_{k1} и L_{k2} , соединенные последовательно. Дроссель, включенный в замкнутую до перекрытия цепь (в данном случае L_{k1}) перемagnetивается, индуктивное сопротивление его резко возрастает и ток в цепи снижается до значения, близкого к нулю. В это время должно быть произведено размыкание рабочего контакта. Таким образом, осуществляется разрыв цепи при отсутствии в ней тока.

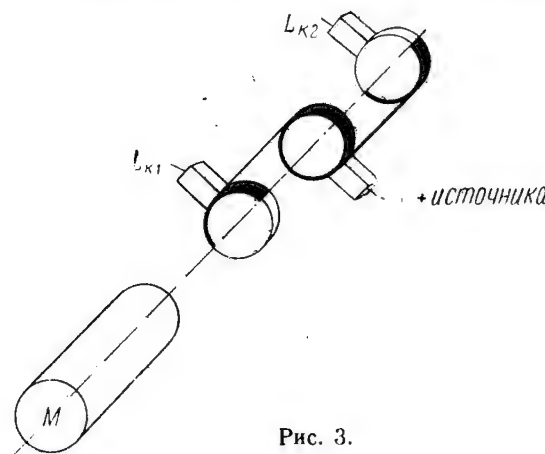


Рис. 3.

В начале следующего полупериода конденсатор C перезарядается, полярность его меняется и работа схемы происходит аналогично вышеописанному.

Дроссели L_k не только снижают ток в проводящей цепи во время коммутации, но и задерживают нарастание обратного напряжения на разрываемых контактах. Эти обстоятельства обеспечивают работу переключателя без искрения и опасности возникновения пробоя контактного промежутка.

Одним из основных узлов преобразователя является контактный переключатель.

В процессе разработки были сконструированы и исследованы переключатели двух типов: а) со скользящими контактами и б) вибрационный.

Переключатель со скользящими контактами (рис. 3) представляет собой схему из трех колец, жестко закрепленных на общем валу. Одно из колец сплошное металлическое, а два других разделены изоляционными промежутками пополам, причем токоведущей является только одна половина каждого из колец. Токоведущие полукольца

смещены друг относительно друга на 180° и связаны электрически со сплошным металлическим кольцом. Кольца приводятся во вращение маломощным вспомогательным электродвигателем постоянного тока типа СЛ с центробежным регулятором числа оборотов. Съем тока осуществляется при помощи неподвижных щеток. Переходу с одной половины колец на другую предшествует кратковременное замыкание токоведущих частей этих колец между собой.

Для регулирования времени перекрытия предусмотрена возможность небольшого перемещения щеток по траверсе (рис. 4). Источник преобразуемого постоянного тока одним полюсом присоединен к средней точке первичной обмотки выходного трансформатора, а другим полюсом через контактные кольца и щетки поочередно

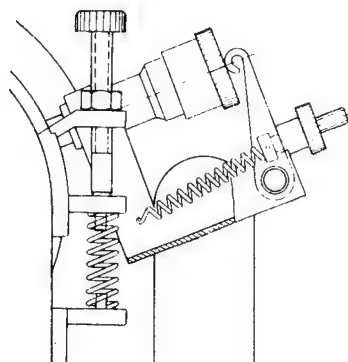


Рис. 4.

подключается к крайним точкам той же обмотки.

Частота переменного тока на выходе преобразователя определяется числом оборотов вспомогательного двигателя и количеством чередующихся проводящих и непроводящих ток ламелей на контактных кольцах переключателя. Например, если кольца разделены на две части, как указано выше, то для получения переменного тока частотой 50 гц двигатель должен давать 3000 об/мин. При необходимости повышения частоты до 400 или 800 гц количество изолированных ламелей следует увеличить соответственно до 16 или 32.

Переключатель вибрационного типа конструктивно имеет много общего с вибратором типа ВА-6,4, выпускаемым отечественной промышленностью для питания переносной радиоаппаратуры. Основное различие заключается в том, что контакты вибропереключателя должны быть рассчитаны на значительно больший рабочий ток и разрывное напряжение, чем контакты вибратора ВА-6,4, что вызывает необходимость применения усиленных контактов, большей мощности электромагнита, более высокой изоляции между контактными пружинами.

В отличие от вибратора ВА-6,4 устройство контактной системы переключателя должно обеспечивать кратковременное перекрытие контактов. Кроме того, вспомогательный контакт в цепи возбуждения электромагнита должен быть электрически изолирован от рабочих контактов.

Внешний вид опытного образца вибропереключателя показан на рис. 5.

При использовании вибропереключателя в качестве коммутирующего устройства рассмотренный ранее принцип работы схемы и основные параметры преобразователя остаются без изменения.

К достоинствам преобразователя с вибропереключателем можно отнести несколько меньшие, по сравнению с преобразователем, использующим переключатель со скользящими контактами, габаритные размеры (при выходной мощности порядка 1 *квт* объем устройства уменьшается примерно на 20 %), меньший шум при работе, удобство замены переключателя в процессе эксплуатации. Мощность, потребляемая вибропереключателем, меньше мощности, потребляемой коммутатором со скользящими контактами, что приводит к некоторому повышению к. п. д. всего устройства в целом.

В случае выходной мощности 1 *квт* увеличение к. п. д. составляет 4—5 %. Однако нужно иметь в виду, что при увеличении мощности преобразователя со скользящими контактами уменьшаются соотношения между объемом, занимаемым переключателем и объемом всего преобразователя, а также и между мощностью переключателя и мощностью преобразователя. Соответственно снижаются преимущества вибропереключателя в отношении габаритных размеров и к. п. д. установки.

Недостатки преобразователя с вибропереключателем заключаются в том, что устройство, изготовление и регулировка последнего сложнее, чем переключателя со скользящими контактами. Это обстоятельство тем более существенно, что надежность работы всего преобразователя в значительной степени определяется качеством изготовления переключателя.

Получение переменного тока при частоте, значительно превышающей промышленную, связано с большими трудностями. Изменение в значительных пределах напряжения, питающего переключатель, приводит к изменению времени перекрытия контактов и возможному срыву коммутации. Таким образом, возникает потребность стабилизации напряжения, питающего электромагнит вибратора. Следует отметить, что если колебания напряжения не превышают $\pm 10\%$, то стабилизация его не является необходимой.

Вышеизложенные соображения позволяют считать, что для преобразователей мощностью до 1 *квт* при частоте 50 *гц*, повидимому, более предпочтительным является вариант с коммутирующим устройством типа вибропереключателя. При мощности преобразователя порядка нескольких киловатт переключатель такого типа, сохраняя свои недостатки, почти не дает выигрыша по габаритным размерам и коэффициенту полезного действия. Поэтому для указанных мощностей, а также при любых мощностях, когда нужно получить переменный ток повышенной частоты, целесообразно применять переключатель со скользящими контактами.

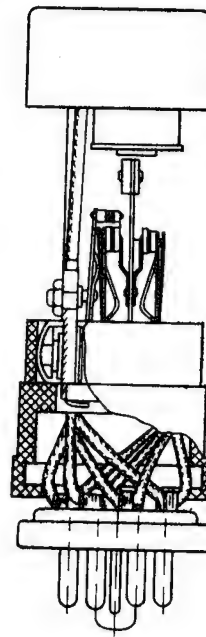


Рис. 5.

В ряде случаев практических применений преобразователь работает в условиях значительных изменений величины питающего напряжения и нагрузки. Поэтому возникает необходимость стабилизации выходного напряжения, которая может быть осуществлена как применением специальных стабилизаторов, так и путем автоматического изменения параметров самого преобразователя. Очевидно, что более рациональным с точки зрения габаритных размеров, коэффициента полезного действия и удобства эксплуатации является второй метод.

Математический анализ работы схемы [1] показывает, что выходное напряжение наиболее резко зависит от величины емкости

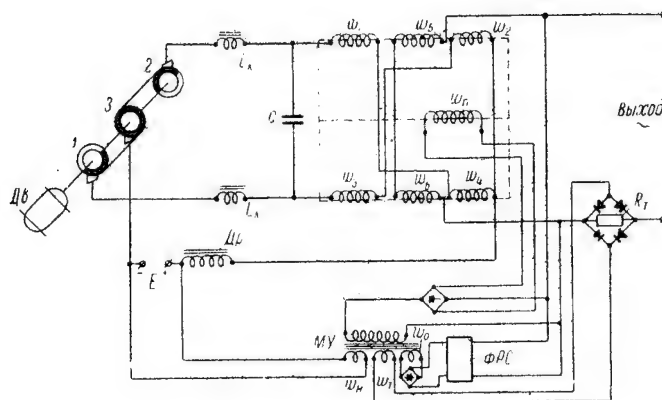


Рис. 6.

коммутирующего конденсатора и индуктивности первичной обмотки выходного трансформатора. Следовательно, стабилизацию выходного напряжения удобнее всего осуществлять путем воздействия на эти параметры преобразователя.

Изменение в значительных пределах емкости конденсатора трудно осуществимо. Более простым и легко поддающимся автоматизации способом является изменение индуктивности первичной обмотки трансформатора при его подмагничивании постоянным током.

На рис. 6. приведена электрическая схема преобразователя со стабилизацией выходного напряжения изменением индуктивности первичной обмотки трансформатора. Как видно из схемы, на среднем стержне Ш-образного сердечника выходного трансформатора помещена обмотка подмагничивания w_{II} . Обмотки переменного тока размещены на крайних стержнях. Первичная обмотка состоит из четырех секций $w_1—w_4$, а вторичная—из двух секций w_5 и w_6 . Секции соединены между собой таким образом, что переменный магнитный поток не попадает в средний стержень трансформатора. Это достигается благодаря тому, что в каждый полупериод работают только размещенные на разных стержнях секции первичной

обмотки трансформатора w_1 , w_3 или w_2 , w_4 . Отклонение выходного напряжения и тока нагрузки от номинальной величины вызывает изменение ампервитков подмагничивания, что, в свою очередь, изменяет индуктивность первичной обмотки таким образом, что напряжение на ней стремится вернуться к первоначальному значению.

Часть приращения входного напряжения преобразователя и напряжение, пропорциональное приращению тока нагрузки, усиливаются магнитным усилителем МУ и после выпрямления подводятся к подмагничивающей обмотке w_H трансформатора. Магнитный усилитель имеет две встречно включенные обмотки управления. К обмотке w_H

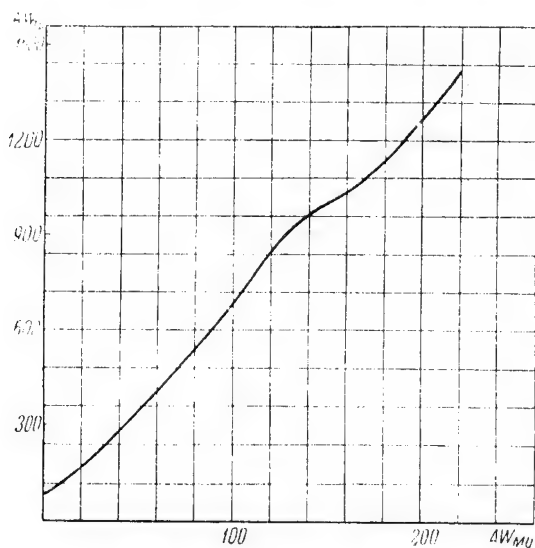


Рис. 7.

подводится напряжение со входа преобразователя, а к обмотке w_T — напряжение, снимаемое с сопротивления R_T , включенного последовательно в цепь нагрузки.

Обмотка опорного напряжения w_H включена согласно с обмоткой w_T и получает питание от вспомогательного маломощного феррорезонансного стабилизатора ФРС, который служит источником эталонного напряжения.

Зависимость необходимых ампервитков подмагничивания трансформатора от управляющих ампервитков МУ при постоянстве выходного напряжения приведена на рис. 7. Начало координат соответствует наименьшим значениям входного напряжения и тока нагрузки.

Таким образом, благодаря применению магнитного усилителя, ток в подмагничивающей обмотке выходного трансформатора, при минимальных значениях входного напряжения и тока нагрузки, близок к нулю.

Необходимое начальное значение тока подмагничивания в обмотке ω_{II} при номинальных значениях входного напряжения и тока нагрузки устанавливается соответствующим расчетом управляющих обмоток магнитного усилителя.

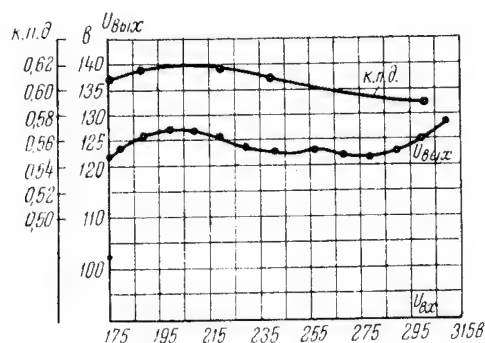


Рис. 8.

Опытные образцы контактных преобразователей со скользящим контактом мощностью 500 и 800 *вт* были рассчитаны на питание от источников постоянного тока с напряжением, не превышающим 350 *в*.

При колебаниях питающего напряжения на $\pm 35\%$ и изменениях тока нагрузки на $\pm 30\%$ выходное напряжение автоматически поддерживалось с точностью $\pm 4\%$.

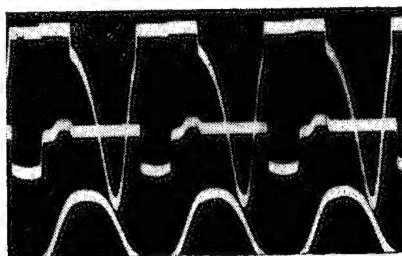


Рис. 9.

Во всем диапазоне изменений входного напряжения и нагрузки коэффициент нелинейных искажений кривой выходного напряжения не превышал 10% .

Коэффициент полезного действия преобразователей 60—65%. Величина его мало меняется при изменениях питающего напряжения и сопротивления нагрузки.

На рис. 8 приведены зависимости выходного напряжения и коэффициента полезного действия от входного напряжения с учетом

одновременного изменения сопротивления нагрузки в указанных выше пределах.

Стабильность частоты переменного тока на выходе преобразователя определяется постоянством числа оборотов приводного электродвигателя. Поэтому необходимо применять двигатель со стабилизированной скоростью.

Осциллограмма выходного напряжения показана на рис. 9.

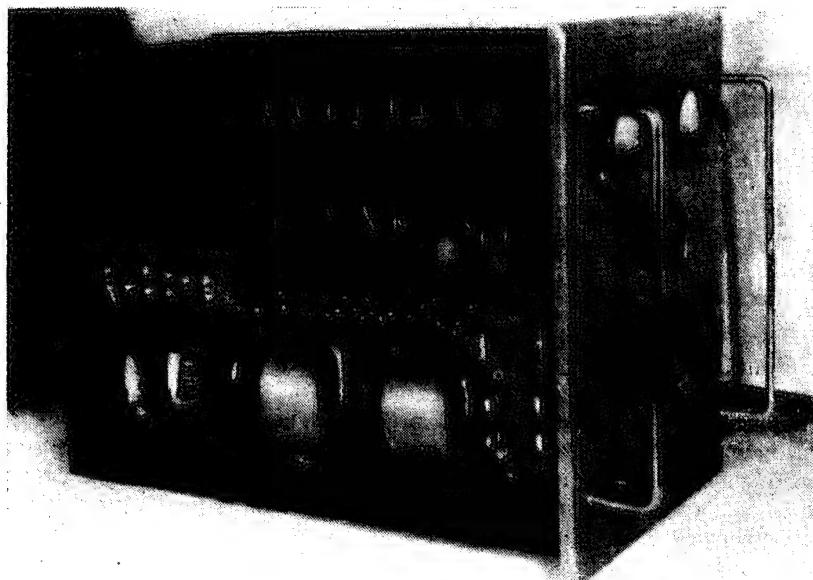


Рис. 10.

Форма кривой выходного напряжения для преобразователя с вибрирующим контактом такая же, как и для преобразователя со скользящим контактом, к. п. д. его на 4—5% выше.

На рис. 10 показан внешний вид преобразователя мощностью 500 *вт*, изготовленного в лаборатории автоматики ЛЭТИ.

В настоящее время на одном из ленинградских заводов выполняется разработка опытных заводских образцов указанных преобразователей, мощностью 800 *вт*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Байда и С. С. Рыбак, Контактный преобразователь постоянного тока в переменный, „Вестник электропромышленности“, 1957.

Поступила в январе 1957 г.

Докт. техн. наук А. В. БАШАРИН

ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

1. Постановка задачи

В последнее время для линейных систем автоматического регулирования был разработан ряд методов синтеза, позволяющих по основным показателям качества выбирать корректирующие устройства. Эти работы достаточно четко можно разделить на две группы: алгебраические и частотные методы синтеза. Однако задачу синтеза линейных систем автоматического управления и регулирования все же нельзя считать решенной в полной мере.

В настоящее время еще нельзя указать сколь-либо полного и приемлемого инженерного метода синтеза нелинейных систем автоматического управления и регулирования, несмотря на ряд положительных попыток в этом направлении.

В настоящей работе излагается графический метод синтеза систем автоматического управления по наперед заданным их статическим и динамическим характеристикам на выходе системы.

Отказавшись от постановки задачи „в малом“, принимаемой для линейных систем автоматического регулирования, автор ставил себе целью разработать метод, позволяющий применительно к системам автоматического управления и регулирования решать задачу синтеза „в большом“ для нелинейных систем.

При решении задачи синтеза систем автоматического управления при больших отклонениях с учетом нелинейности характеристик и связей системы в настоящей работе принята следующая постановка.

Предположено, что структура, статические характеристики звеньев и численные значения параметров основной части системы управления являются заданными. На основании заданных статических и динамических характеристик на выходе системы определению подлежат:

а) Число, вид (последовательная или параллельная, гибкая или жесткая, линейная или нелинейная) и место включения управляющих и стабилизирующих связей.

б) Структура и численные значения параметров связей.

в) Форма входного воздействия на систему, если последняя не оговорена в задании.

Для решения задачи синтеза систем управления рекомендуется графический метод, разработанный автором и изложенный в [1] и частично в [2, 3], позволяющий с помощью обратных построений получить решение поставленной задачи.

Так как исходными для синтеза являются заданные статическая и динамическая характеристики на выходе системы, то графический синтез производится от выхода к входу системы (в обратном порядке по отношению к построению переходного процесса). Ввиду поэлементного характера построений при пользовании разработанным графическим методом, графический синтез системы управления производится также поэлементно, начиная с выходных звеньев и кончая входными. При синтезе последующих звеньев (по ходу синтеза) с целью получения оптимальных решений является возможной и целесообразной корректировка параметров предыдущих уже синтезированных звеньев.

Так как синтезируемая система должна обеспечивать заданные статические и динамические характеристики на выходе, то весь ход синтеза проводится в два этапа:

а) Синтез системы по заданным статическим характеристикам, позволяющий выбрать вид, место включения и параметры основных жестких связей, удовлетворяющих поставленным требованиям.

б) Синтез системы по заданным динамическим характеристикам с учетом уже выбранной структуры и параметров системы по статическому синтезу. При этом определяют вид, место включения и параметры гибких связей, и форму входного воздействия на систему, удовлетворяющих поставленным требованиям. Естественно, что при синтезе системы по динамическим характеристикам может потребоваться коррекция полученной ранее структуры или параметров системы. Формы возможной и потребной коррекции непосредственно вытекают из сопоставления результатов статического и динамического синтеза.

Обратимся теперь к рассмотрению метода синтеза в его общем виде.

2. О синтезе обобщенного элементарного звена системы автоматического управления

Для элементарного звена системы автоматического управления в общем случае может быть написано дифференциальное уравнение вида:

$$A_i \frac{dy_i}{dt} + \sum x_i = \sum \left[F(t) + F_k(y_k) + F_e\left(\frac{dy_e}{dt}\right) + F_{sq}(y_s \cdot y_q) \right], \quad (1)$$

где:

$$A_i = \sum_{p=1}^m a_p;$$

$$\sum x_i = \sum_{p=1}^m x_p$$

$$\sum \left[F(t) + F_k(y_k) + F_e \left(\frac{dy_e}{dt} \right) + F_{sq}(y_s \cdot y_q) \right] =$$

$$= \sum_{p=1}^m F_p(t) + \sum_{p=1}^m \sum_{k=1}^n F_{pk}(y_k) + \sum_{p=1}^m \sum_{e=1}^n F_{pe} \left(\frac{dy_e}{dt} \right) + \sum_{p=1}^m \sum_{s,q=1}^n F_{psq}(y_s \cdot y_q).$$

(Суммирование производится по числу воздействий на каждый управляющий контур и по числу управляющих контуров).

Для системы автоматического управления, содержащей n элементарных звеньев, можно написать n уравнений движения основных координат вида (1) и n уравнений статических характеристик звеньев вида

$$y_k = f \left(\sum_{i=1}^n x_{ki} \right), \quad (2)$$

которые в совокупности будут определять движение системы в целом.

Для графического решения дифференциальное уравнение (1) заменяется приближенным уравнением, выраженным в конечных разностях, и представляется в форме отношения:

$$\frac{\Delta y_i}{\sum \left[F(t) + F_k(y_k) + F_e \left(\frac{\Delta y_e}{\Delta t} \right) + F_{sq}(y_s \cdot y_q) \right] \Delta t} = \frac{\Delta t}{A_i} = \operatorname{tg} \alpha_i. \quad (3)$$

В разработанном графическом методе расчета переходных процессов и статических характеристик на выходе систем автоматического управления [1] основой для графических построений являлись геометрические места точек для установившихся значений составляющих входных воздействий на звено, выраженных функциями воздействующих координат или их производных. Эти геометрические места представляют собой статические характеристики связей элементарного звена. Уравнения статических характеристик связей представляются членами, стоящими в квадратной скобке уравнения (1). Статические характеристики связей элементарных звеньев являются основой для структурного синтеза систем автоматического управления и для выбора численных значений параметров системы при синтезе последней. Вид статических характеристик связей элементарного звена зависит только от структуры связи.

При графических построениях выявляется также вторая группа геометрических мест, жестко связанная с первой. Эти геометрические места представляют собой совокупности расположений точек,

исходных для проведения лучей построения, т. е. определяют собой для каждого элементарного звена установившиеся значения суммарных (результатирующих) входных воздействий, выраженных как функция основной координаты элементарного звена. Эти геометрические места представляют собой эквивалентные статические характеристики входных воздействий.

Эквивалентная статическая характеристика входных воздействий зависит как от общей структуры элементарного звена, так и от характера возмущающих воздействий.

Задачей статического синтеза является по заданным установившимся значениям выходной (основной) координаты элементарного звена, соответствующим заданным точкам статической характеристики системы, определить суммарное входное воздействие на звено от жестких связей ΣF и разбить его на соответствующие составляющие F , т. е. определить характеристики, а по ним структуру и численные значения параметров жестких связей.

При синтезе систем по динамическим характеристикам в первую очередь определяются эквивалентные статические характеристики входных воздействий для каждого элементарного звена, и они являются исходными для определения статических характеристик связей и структуры элементарного звена. Действительно, функция $y_i = f(t)$, являющаяся основной (выходной) координатой рассматриваемого звена, при синтезе задана. Имея последнее обстоятельство в виду, уравнение (3) можно переписать в виде:

$$\Sigma \left[F(t) + F_k(y_k) + F_e \left(\frac{\Delta y_e}{\Delta t} \right) + F_{sq}(y_s \cdot y_q) \right] = \frac{\Delta y_i}{\operatorname{tg} \alpha_i} + \Sigma x_i. \quad (4)$$

Так как статическая характеристика звена задана, то в правой части уравнения (4) Δy_i и Σx_i являются известными величинами. В самом деле, если в одной координатной системе отложить статическую характеристику звена $y_i = f(\Sigma x_i)$, а в другой — зависимость $y_i = f(t)$, то, выбрав интервал времени Δt и проведя во второй координатной системе ряд вертикалей, равноотстоящих друг от друга на величину Δt , можно на кривой $y_i = f(t)$ получить ряд точек, определяющих приращения основной координаты Δy_i на отдельных интервалах времени.

Проведя через полученные точки горизонталы в первую координатную систему, нетрудно с помощью статической характеристики звена определить значения Σx_i для отдельных интервалов времени (рис. 1).

Если предположить $\operatorname{tg} \alpha_i$ известным (об определении $\operatorname{tg} \alpha_i$ будет сказано ниже), то в правой части уравнения (4) оказываются известными все величины и левая часть уравнения находится однозначно для каждого интервала времени.

Таким образом:

$$\Sigma \left[F(t) + F_k(y_k) + F_e \left(\frac{\Delta y_e}{\Delta t} \right) + F_{sq}(y_s \cdot y_q) \right] = \varphi(y_i). \quad (5)$$

Проведением лучей построения под углом α'_i из полученных в первой координатной системе точек до горизонталей предыдущего состояния, мы получим ряд точек, определяющих значения функции $\varphi(y_i)$ на отдельных интервалах времени. В совокупности эти точки определяют геометрическое место точек, соответствующее функции $\varphi(y_i)$ (рис. 2), представляющее собой эквивалентную статическую характеристику входных воздействий.

Так как функция $\varphi(y_i)$ на каждом интервале времени определяет значение алгебраической суммы составляющих установившихся входных воздействий на звено, стоящей в квадратной скобке левой

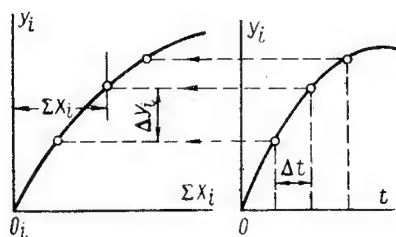


Рис. 1. Определение приращений координаты звена по заданному переходному процессу

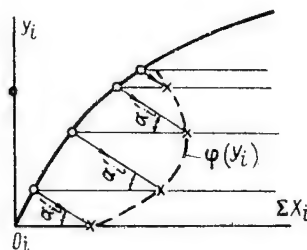


Рис. 2. Определение статической характеристики входных воздействий

части уравнения (5), то дальнейшей задачей синтеза является отыскание этих составляющих. При этом, так как параметры и характеристики жестких связей были предварительно выбраны на основании статических характеристик системы, то задачей синтеза по динамическим характеристикам является определение параметров корректирующих гибких связей и, если это необходимо, коррекция выбранных ранее жестких связей.

Итак, в основу графического синтеза систем автоматического управления по элементарным звеньям должны быть положены:

- а) Статические характеристики связей элементарных звеньев.
- в) Эквивалентные статические характеристики входных воздействий на элементарное звено.

Рассмотрим подробнее эти характеристики.

3. Статические характеристики связей элементарного звена

Составляющие $F(t)$; $F_k(y_k)$; $F_e\left(\frac{dy_e}{dt}\right)$; $F_{sq}(y_s \cdot y_q)$, стоящие в квадратной скобке под знаком суммы в выражении (1), представляют собой уравнения статических характеристик связей, определяющих зависимость величины установившихся значений составляющих входного воздействия на звено от изменения независимой переменной t , координат системы или их производных.

В табл. 1 приведены типовые формы статических характеристик связей, причем в левой колонке указаны уравнения связей, в средней

приведены статические характеристики (сплошными линиями указаны статические характеристики для положительных связей, пунктирными линиями — для отрицательных связей), а в правой колонке указаны примеры структуры связи применительно к автоматическому управлению электрическими машинами. В строках 1, 2, 3, 4 приведены типовые характеристики простейших связей, а в строках 5, 6, 7 — статические характеристики типовых комбинаций связей.

Следует заметить, что к указанным выше типовым статическим характеристикам относятся также связи, обладающие люфтом, сухим (кулоновским) трением, связи релейного действия и т. п.

Таким образом, можно указать лишь весьма ограниченное количество типовых простейших статических характеристик связей. К указанным типовым формам статических характеристик связей приводится подавляющее большинство характеристик связей, имеющих применение в системах автоматического управления и регулирования.

Статическая характеристика связи сложной формы может быть представлена в виде комбинации статических характеристик простейших типовых линейных или нелинейных связей, т. е. приведена к комбинации указанных выше статических характеристик связей.

Определив потребную аппроксимацию сложной связи простейшими, нетрудно по их типовым статическим характеристикам установить структуру связи. С другой стороны, разложение полученной (желаемой) статической характеристики связи на простейшие должно производиться с учетом имеющихся типовых форм статических характеристик простейших связей, что позволит обеспечить физическую осуществимость найденной структуры связи.

4. Эквивалентные статические характеристики входных воздействий

В табл. 2 приведены основные типовые статические характеристики входных воздействий. В первом столбце таблицы указана форма возмущающей функции, во втором столбце приводится форма статической характеристики входного воздействия, а в третьем столбце помещены примеры структуры звена, отвечающие рассматриваемым случаям, применительно к системам автоматического управления электрическими машинами.

Во втором столбце цифрами 1, 2, 3 указаны статические характеристики входных воздействий соответственно для подъема, спада и реверса выходной координаты звена y_i .

В строках 1, 2, 3, 4, 5 приведены типовые формы статических характеристик входных воздействий для одной связи при различных типовых формах возмущающих функций на входе связи.

Следует заметить, что при одной и той же структуре звена и возмущающей функции, статическая характеристика входных воздействий в зависимости от соотношения численных значений параметров может принимать различные формы, что особенно существенно при колебательном характере возмущающей функции,

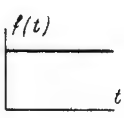
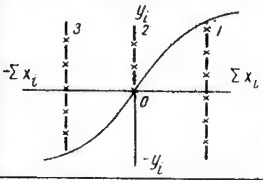
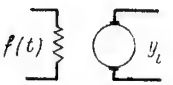
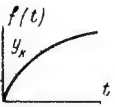
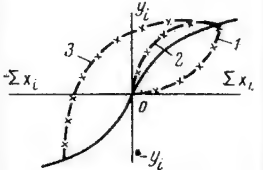
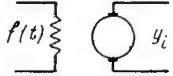
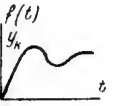
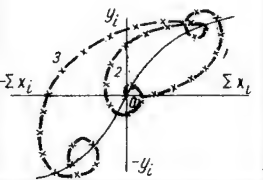

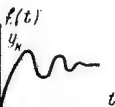
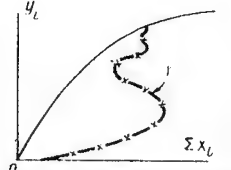
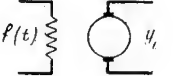
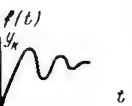
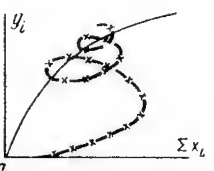
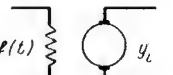
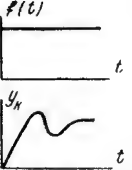
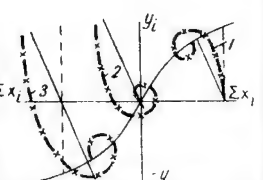
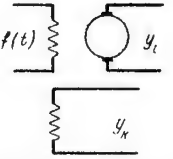
Таблица 1

N n/n	Уравнение связи	Форма статической характеристики связи	Пример структуры связи
1	$F(t) = \kappa f(t)$ $F(y_n) = \kappa y_n$ $F(\frac{\Delta y_g}{\Delta t}) = \kappa \Delta y_g$		
2	$F(y_s, y_g) = f(y_s) \cdot y_g$		
3	$F(y_n) = f_1(y_n) y_n$ $F(\frac{\Delta y_g}{\Delta t}) = f_1(y_g) \Delta y_g$		
4	$F(y_n) = f_2(y_n) y_n$ $F(\frac{\Delta y_g}{\Delta t}) = f_2(y_g) \Delta y_g$		

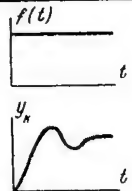
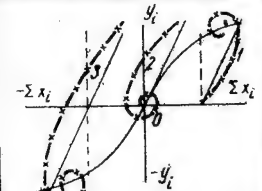
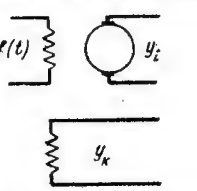
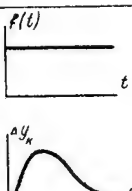
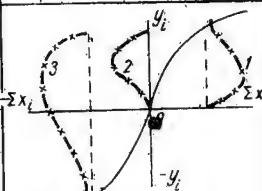
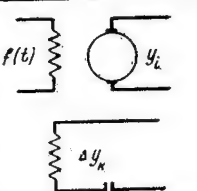
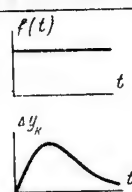
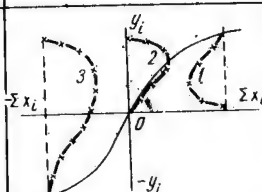
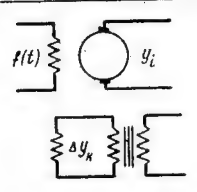
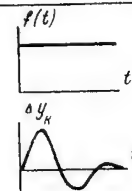
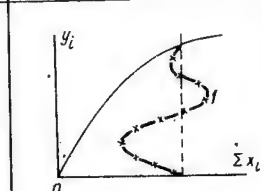
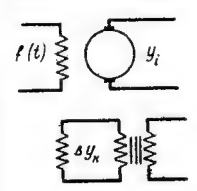
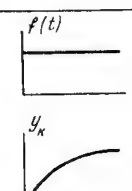
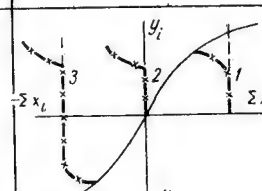
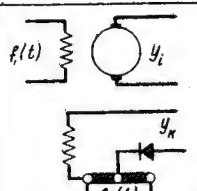
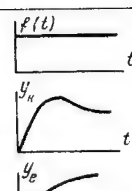
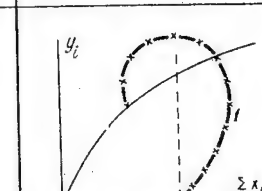
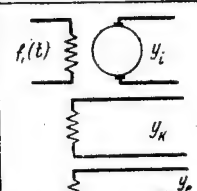
Продолжение табл. 1

N n/n	Уравнение связи	Форма статической характеристики связи	Пример структуры связи
5	$\Sigma F = F(t) + F_K(y_K) = A + \kappa y_K$		
6	$\begin{aligned} \Sigma F &= F_K[f(t)] + F_K(y_K) = \\ &= F_K[f(t) + y_K] = \\ &= \kappa[A + y_K] \end{aligned}$		
7	$\begin{aligned} \Sigma F &= F_K[f(t)] + F_K(y_K) = \\ &= F_K[f(t) + y_K] = \\ &= f(y_K)[A + y_K] \end{aligned}$		

Таблица 2

N n/p	Возмущающая функция	Форма статической характе- ристики входного воздействия	Пример структуры звена
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Продолжение табл. 2

N n/n	Возмущающая функция	Форма статической характе- ристики входного воздействия	Пример структуры звена
7			
8			
9			
10			
11			
12			

В последнем случае при значительном числе колебаний статическая характеристика входных воздействий может принимать одну из форм, указанную в 4 и 5 строках табл. 2.

Приведенные в строках 1—5 табл. 2 типовые формы статических характеристик входных воздействий показывают, что эти характеристики представляют собой деформированные функции возмущения, причем степень и характер деформации зависят от формы статической характеристики звена, формы статической характеристики связи и от наклона луча построений, т. е. от соотношения численных значений параметров звена.

Таким образом, вид статической характеристики входных воздействий любой связи позволяет судить о характере возмущающей функции, действующей на вход связи. Однако в большинстве случаев входное воздействие на элементарное звено осуществляется с помощью нескольких связей.

В строках 6, 7, 8, 9, 10, 11 табл. 2 приведены статические характеристики входных воздействий для типовых комбинаций связей при различных типовых формах возмущающих функций на входе каждой связи.

Возвращаясь к уравнению эквивалентной статической характеристики входных воздействий (5), представим его в виде суммы оставляющих:

$$\varphi(y_i) = \varphi_1(y_i) + \varphi_2(y_i) + \dots + \varphi_n(y_i),$$

где:

$$\left. \begin{aligned} F(t) &= \varphi_1(y_i) \\ F_k(y_k) &= \varphi_2(y_i) \\ F_e\left(\frac{\Delta y_e}{\Delta t}\right) &= \varphi_3(y_i) \\ \dots &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Уравнения системы (6) представляют собой уравнения составляющих установившихся входных воздействий на элементарное звено, выраженных функциями выходной координаты звена y_i . Эти уравнения представляют собой уравнения статических характеристик элементарных составляющих входных воздействий на звено, т. е. уравнения деформированных указанным выше образом возмущающих функций отдельных связей.

В строке 12 табл. 2 приведен общий случай воздействия четырех связей на звено при различных формах возмущающих функций. Уравнение эквивалентной статической характеристики входных воздействий для рассматриваемого звена примет вид:

$$\begin{aligned} F_1(t) + F_2(t) + F_k(y_k) + F_e(y_e) &= \\ &= \varphi(y_i) = \varphi_1(y_i) + \varphi_2(y_i) + \varphi_3(y_i) + \varphi_4(y_i) \end{aligned}$$

или:

$$\varphi(y_i) = \varphi'(y_i) + \varphi_2(y_i) + \varphi_3(y_i).$$

Пользуясь типовыми элементарными статическими характеристиками входных воздействий для различных форм связей и возмущающих функций, можно осуществить расчленение функции $\varphi(y_i)$ сложной конфигурации на элементарные составляющие типовых форм. На рис. 3 приведено одно из возможных расчленений рассматриваемой функции на три составляющие:

составляющую $\varphi'(y_i)$, являющуюся типовой формой для связи с отсечкой при монотонно изменяющейся возмущающей функции;

составляющую $\varphi_2(y_i)$, являющуюся типовой формой статической характеристики для связи и возмущающей функции, указанных в строке 1 табл. 2;

составляющую $\varphi_3(y_i)$, являющуюся типовой формой статической характеристики, указанной в строке 3 табл. 2 для связи по координате при колебательном характере возмущающей функции.

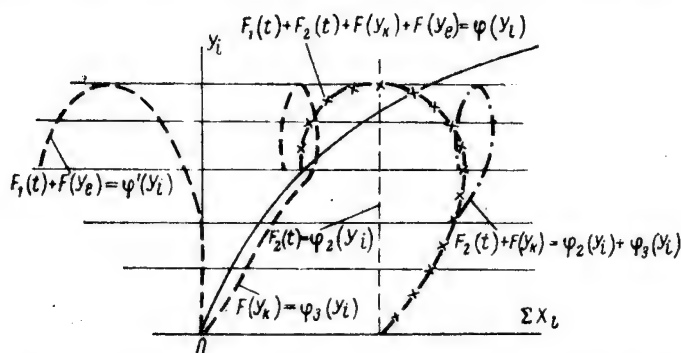


Рис. 3. Расчленение сложной статической характеристики входных воздействий на простейшие типовые

Расчленив эквивалентную статическую характеристику входных воздействий на типовые простейшие составляющие, для окончательного решения задачи синтеза элементарного звена необходимо:

1. Определить, какая из координат системы имеет искомый характер изменения и может являться возмущающей функцией. Тем самым будет установлено место включения связи.

2. Установить форму статической характеристики связи (так как статическая характеристика звена и угол наклона луча построений уже известны), деформирующей возмущающую функцию в желаемую (найденную) форму элементарной статической характеристики входного воздействия.

3. Определить численные значения параметров связей.

5. Предварительный синтез жестких управляющих связей по статической характеристике на выходе системы управления

Допустим, что исходная статическая характеристика представляет собой зависимость между выходной координатой системы y и неко-

торой координатой z , которая может быть как независимой координатой, так и одной из основных координат системы.

Отложив статическую характеристику в координатах $z—y$, разобьем ее произвольно на участки путем проведения вертикалей,

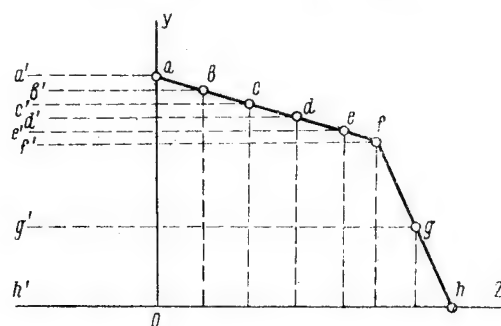


Рис. 4. К синтезу по заданной статической характеристике на выходе системы

проходящих через некоторые фиксированные значения координаты z (рис. 4). Точки a, b, c, d, e, f, g, h на рис. 4 определяют значения выходной координаты y для фиксированных значений координаты z . Проведением горизонталей полученные значения координаты y сносятся в координатную систему выходного звена на его статическую характеристику (точки $a', b', c', d', e', f', g', h'$).

Так как в большинстве случаев выходное звено и часть промежуточных звеньев не имеют жестких связей, воздействующих на вход,

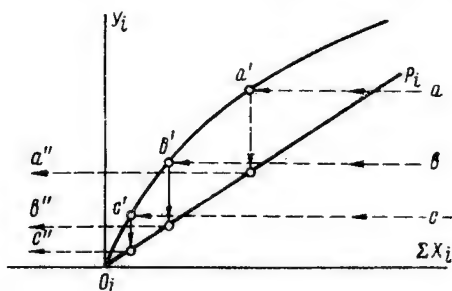


Рис. 5. К синтезу по заданной статической характеристике на выходе системы (промежуточное звено)

помимо основной прямой связи их с предыдущим звеном, то дальнейшее графическое построение в таких звеньях является предельно простым.

На рис. 5 показан ход построения в координатной системе такого элементарного звена. Так как характер и параметры основной связи известны, то по ним однозначно определяется вид и положение

ние статической характеристики связи, изображенной на рис. 5 лучом $O_i P_i$. Из точек a' , b' , c' , полученных снесением из координатной системы последующего звена, определяющих требуемые значения координаты y_i , проводятся вертикали до пересечения со статической характеристикой связи. Найденные точки a'' , b'' , c'' определяющие требуемые значения координаты y_{i-1} предыдущего звена, горизонталями сносятся в координатную систему этого звена на его статическую характеристику.

Допустим теперь, что звено с выходной координатой y_i представляет собой то звено, на которое осуществляется стороннее воздействие и воздействие управляющих связей (обычно входное звено системы), и требуется определить статические характеристики и целесообразные места включения этих связей.

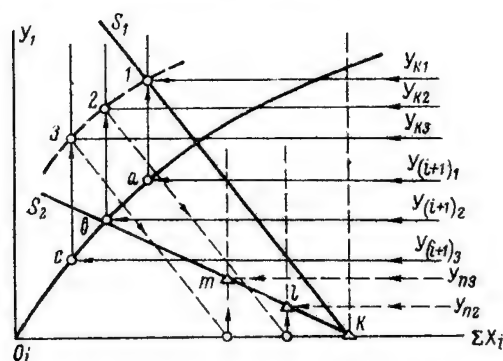


Рис. 6. К синтезу по заданной статической характеристике на выходе системы (входное звено)

Предполагая установившееся значение стороннего входного воздействия известным ($F(t) = F(t)_{\text{уст}}$), отложим его по оси абсцисс синтезируемого звена (точка K на рис. 6). Снеся найденные значения координаты y_i из последующей координатной системы звена y_{i+1} на статическую характеристику рассматриваемого звена, проведем через полученные точки a , b , c вертикальные прямые (рис. 6).

Выберем одну из координат системы, скажем y_k , за основную управляющую координату. Выбор основной управляющей координаты производится, исходя из наилучшего удовлетворения статическим и динамическим характеристикам, на основании одновременного синтеза звена по статическим и динамическим характеристикам, о чем подробнее будет сказано далее.

Проводя горизонтали для последовательных значений координаты y_k до соответствующих вертикалей, проходящих через точки a , b , c в координатной системе звена y_i , получим результирующую статическую характеристику, определяемую точками пересечения 1, 2, 3 (пунктирная линия на рис. 6).

Следует заметить, что, проводя аналогичные построения из координатных систем других звеньев, можно обеспечить наиболее благоприятный выбор основной управляющей координаты.

Если полученная статическая характеристика (1, 2, 3) не может быть осуществлена с помощью одной управляющей связи, то, выбирая основную управляющую связь в виде простейшей, проводим ее статическую характеристику с таким расчетом, чтобы вариации дополнительных связей были минимальными.

На рис. 6 в качестве статической характеристики основной управляющей связи принята прямая KS_1 , проведенная через точку 1.

Проводя из точек результирующей статической характеристики (2, 3) линии, параллельные лучу KS_1 , до пересечения с осью абсцисс, проведем через полученные точки вертикали.

Аналогично предыдущему будем сносить на полученные вертикали соответствующие значения координат других звеньев. При этом получим ряд статических характеристик связей по соответствующим координатам. Из всех этих характеристик выберем физически осуществимую и наиболее простую, тем самым будет определено место включения дополнительной связи.

Допустим, что для случая, рассматриваемого на рис. 6, наилучшую статическую характеристику определила координата y_n (точки K, l, m). Так как эти точки лежат на прямой, то проводя через точки K, l, m прямую, получим искомую статическую характеристику дополнительной управляющей связи по координате y_n в виде луча KS_2 .

В случае, если не удастся добиться окончательного решения введением лишь одной дополнительной связи, аналогично изложенному выше производится выделение второй управляющей связи и ищется характеристика и место включения третьей управляющей связи.

Изложенный метод нахождения числа, места включения и характеристик управляющих связей звена по значениям координат звеньев системы и по типовым статическим характеристикам связей может быть применен к любому звену для отыскания любого количества жестких связей.

Для пояснения описанного выше метода предварительного синтеза жестких управляющих связей системы по ее статическим характеристикам на рис. 7 приведен пример синтеза для системы, состоящей из трех звеньев.

Предположим, что на входе системы имеется постоянное возмущающее воздействие $F(t) = \text{const}$, на выходное звено действует независимая координата z и желаемая статическая характеристика системы задана в виде зависимости выходной координаты системы y_3 от независимой координаты z . Пусть эта зависимость представляет собой возвышающуюся прямую, изображенную на рис. 7 в правой координатной системе $z - y_3$.

Предполагая, что управляющие связи воздействуют на вход первого звена, проведем указанные выше построения и определим на статической характеристике первого звена точки, соответствующие заданной статической характеристике на выходе системы.

Ход построения на рис. 7 для крайних точек статической характеристики системы обозначен: для одной — порядковыми номерами, для другой — буквами в порядке алфавита.

Выберем в качестве основной управляющей координаты — выходную координату y_3 . Проведем из точек 2-6 горизонтали в координатную систему первого звена до пересечения с вертикалями, проходящими через найденные точки 6-f. Полученные точки пересечения определяют результирующую статическую характеристику связей (линия, проходящая через точки 7-g).

Имея в виду, что полученная характеристика не является типовой и не может быть осуществлена с помощью одной управляющей

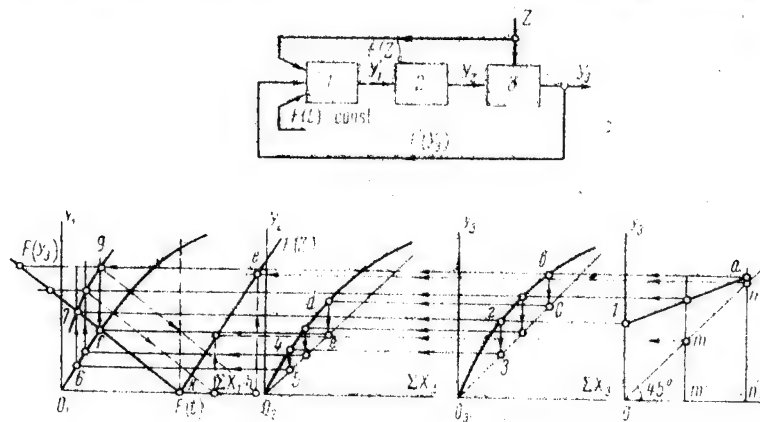


Рис. 7. Пример статического синтеза системы управления

связи по координате y_3 , выберем статическую характеристику основной управляющей связи $F(y_3)$ по координате y_3 линейной и проходящей через точку 7, для которой координата z имеет нулевое значение.

Отложив выбранную статическую характеристику от точки К через точку 7, из остальных точек результирующей статической характеристики проводим линии, параллельные лучу К-7, до пересечения с осью абсцисс и восстанавливаем перпендикуляры.

Проведя в правой координатной системе луч под углом 45° , сплосим с помощью его на полученные в первой координатной системе вертикали соответствующие значения координаты z (o, m', n'). Полученные точки пересечения лежат на одной прямой и позволяют удовлетворить заданным требованиям путем введения дополнительной управляющей связи по независимой координате z , статическая характеристика которой представляется лучом К-е. Нетрудно видеть, что связь по координате y_3 должна быть отрицательной, а по координате z — положительной.

Структурная схема для рассматриваемого случая изображена на том же рис. 7.

Дальнейшей задачей синтеза системы является проверка удовлетворения найденных статических характеристик жестких связей заданным динамическим характеристикам системы, нахождение потребных гибких корректирующих связей и, в случае необходимости, коррекция полученных жестких связей.

6. Об определении $\operatorname{tg} \alpha_i$ при синтезе элементарного звена

При определении эквивалентной статической характеристики входных воздействий $\varphi(y_i)$ элементарного звена был предположен известным тангенс угла наклона луча построений — $\operatorname{tg} \alpha_i$. Укажем теперь пути определения или выбора величины $\operatorname{tg} \alpha_i$ при синтезе.

Если у элементарного звена не имеется дополнительных связей помимо основной связи с предыдущим звеном, и параметры основной связи известны, то $\operatorname{tg} \alpha_i$ определяется по параметрам звена и связи из известного соотношения:

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{\Delta t}{A_i} = \frac{\Delta t}{a_i}.$$

В том случае, когда на элементарное звено воздействует несколько связей, $\operatorname{tg} \alpha_i$ будет определяться выражением:

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{\Delta t}{A_i} = \frac{\Delta t}{a_1 + a_2 + a_3 + \dots} = \frac{\Delta t}{\sum_{k=1}^n a_k}.$$

Допустим, что известны характеристики и параметры лишь части связей, а остальные являются искомыми.

Выделяя в выражении для $\operatorname{tg} \alpha_i$ лишь известную часть, вычислим значение его в пренебрежении неизвестной частью. В этом случае мы получим максимально возможное значение $\operatorname{tg} \alpha_i$ для рассматриваемого звена, как если бы остальные связи отсутствовали:

$$\operatorname{tg} \alpha_{i \max} = \frac{\Delta t}{a_1 + a_2 + \dots + a_k} > \operatorname{tg} \alpha_i.$$

На рис. 8 луч ab , проведенный из точки a под углом $\alpha'_{i \max}$ к горизонтали, определяет предельное положение луча построения в координатной системе звена с координатой y_i .

С другой стороны, может быть установлено минимально возможное значение $\operatorname{tg} \alpha_i$ на основании данных предыдущего звена, и, в частности, входного звена. В координатной системе входного звена $\operatorname{tg} \alpha$ может быть найден по начальной точке, положение которой определяется начальным значением стороннего входного воздействия (или прямых связей).

Следует напомнить, что при построении переходных процессов в системе в первом приближении на первом интервале времени действие обратных связей не учитывается, и начальная точка построений для первого интервала времени определяется только значением координат прямых связей.

Полагая для простоты, что звено с координатой y_{i-1} представляет собой входное звено, и вычислив $\text{tg } \alpha_{(i-1) \max}$ для входного звена по параметрам уже известных связей согласно изложенному выше, проведем из начальной точки K луч построений под углом $\alpha'_{(i-1) \max}$ до пересечения со статической характеристикой входного звена в точке I (рис. 8). Точка I определяет максимально допустимое приращение координаты y_{i-1} на первом интервале времени. Снося полученное значение координаты y_{i-1} на луч прямой связи в координатной системе звена y_i (точка 2) и найденную точку — вертикалью на ось абсцисс, получим точку C .

Соединяя лучом точки a и C , получим второе предельное положение луча построений в координатной системе звена i , соответствующее минимальному значению угла наклона $\alpha'_{i \min}$.

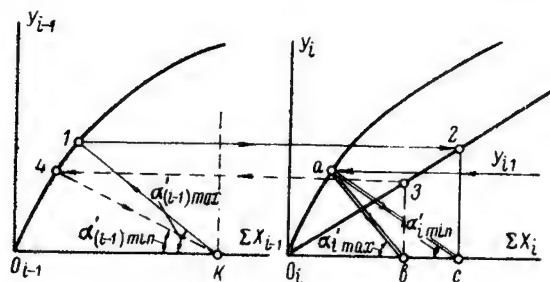


Рис. 8. К определению угла наклона луча построений

Таким образом, угол наклона луча построений рассматриваемого звена должен лежать в пределах:

$$\alpha'_{i \min} \leq \alpha'_i \leq \alpha'_{i \max}$$

Если из точки b провести вертикаль до статической характеристики связи с предыдущим звеном (точка 3) и из найденной точки пересечения провести горизонталь до статической характеристики входного звена, то полученная точка 4 определит второе граничное положение луча построений входного звена, соответствующее минимальному значению угла $\alpha'_{(i-1) \min}$.

Заметим попутно, что выбор угла наклона луча построений может корректироваться на основании последующих значений координаты y_i рассматриваемого звена, исходя из стремления получить наиболее удобную форму эквивалентной статической характеристики входных воздействий.

Следует заметить, что введение второго приближения по прямым и обратным связям позволяет уточнить выбор величины $\text{tg } \alpha_i$ и положения луча построений в каждом звене, на что следует обратить внимание при практическом применении метода.

7. Определение структуры, места включения и характеристик связей элементарного звена при синтезе по динамическим характеристикам

С целью пояснения метода рассмотрим для начала элементарное звено, обладающее лишь одной прямой жесткой связью, и будем предполагать, что закон изменения входной координаты звена y_{i-1} известен.

Последнее предположение базируется на том, что входная координата y_{i-1} , являющаяся прямой связью, может быть либо независимой координатой, тогда закон изменения ее обычно задается, либо основной координатой предыдущего звена, тогда закон изменения

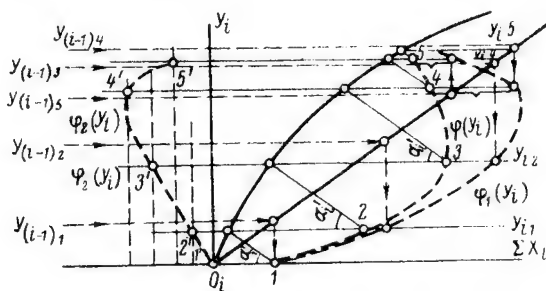


Рис. 9. Определение искомой статической характеристики входных воздействий

ее может быть выбран, исходя из соображений физической осуществимости процесса в предыдущем звене и оптимальности использования предыдущего звена (включая наибольшую простоту структуры звена).

Заметим кстати, что выбор оптимального наперед заданного закона изменения основной координаты предыдущего звена при синтезе последующего необходим лишь в том случае, когда синтезируемое звено является промежуточным и обладает несколькими связями, из которых часть подлежит определению.

Отложив в координатной системе звена i статическую характеристику звена и статическую характеристику связи, проведем горизонталы, соответствующие последовательным значениям выходной координаты звена y_i . Выбрав величину угла α_i , обратным построением находим результирующую статическую характеристику входных воздействий $\varphi(y_i)$ (рис. 9, точки 1, 2, 3, 4, 5).

Проведя горизонталы, соответствующие последовательным значениям координаты y_{i-1} , до пересечения со статической характеристикой связи, снесем полученные точки на горизонталы соответственных значений координаты y_i . Найденная таким путем кривая представляет собой статическую характеристику $\varphi_1(y_i)$ составляющей входных воздействий по координате y_{i-1} .

Определяя разности абсцисс соответственных точек статических характеристик входных воздействий $\varphi(y_i)$ и $\varphi_1(y_i)$ и откладывая полученные значения разностей, с учетом их знака, от оси ординат по тем же горизонталям, получим статическую характеристику дополнительной составляющей входных воздействий:

$$\varphi_2(y_i) = \varphi(y_i) - \varphi_1(y_i).$$

На рис. 9 статическая характеристика $\varphi_2(y_i)$ определяется точками $1', 2', 3', 4', 5'$.

Через полученные точки $1', 2', 3', 4', 5' \dots$ статической характеристики $\varphi_2(y_i)$ проведем ряд вертикалей (рис. 10).

Имея в виду, что дополнительная корректирующая связь предполагается гибкой, на что указывает также форма статической

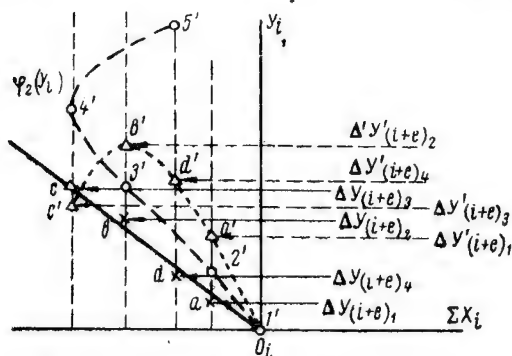


Рис. 10. Определение статической характеристики и места включения гибкой связи

характеристики $\varphi_2(y_i)$, можно указать два пути дальнейшего решения задачи.

1. Предположим, что основная структура звена гибкой связи известна, т. е. известны: статическая характеристика звена, угол наклона луча построений и статические характеристики связей его с предыдущими звеньями. Предполагая вход звена гибкой связи подключенным последовательно к выходу различных звеньев системы, найдем значения приращения выходной координаты звена гибкой связи y_{i+e} для различных мест ее включения.

Полученные зависимости будут представлять собой преобразованные (деформированные) с помощью звена $i+e$ законы изменения производных от координат соответствующих звеньев.

Будем сносить найденные значения приращений координаты y_{i+e} на соответствующие вертикали, проведенные через точки $1', 2', 3', 4', 5'$ статической характеристики $\varphi_2(y_i)$. Найденные таким образом точки должны определить форму статической характеристики связи при различных вариантах включения гибкой связи.

На рис. 10 точки a, b, c, d определяют статическую характеристику связи для варианта подключения гибкой связи, определяющего

приращения Δy_{i+e} координаты звена гибкой связи, а точки a' , b' , c' , d' — статическую характеристику связи для варианта включения, определяющего приращения $\Delta y'_{i+e}$.

Форма статической характеристики, определяемой точками a' , b' , c' , d' , показывает, что физическое осуществление связи при этом варианте ее подключения практически затруднено, в то время как расположение точек a , b , c , d указывает на физическую осуществимость связи для данного варианта.

Следует заметить, что некоторого улучшения в расположении точек, определяющих статическую характеристику связи, после выбора места включения связи можно добиться вариацией параметров связи, т. е. изменяя степень деформации характеристики изменения производной входной координаты корректирующего звена.

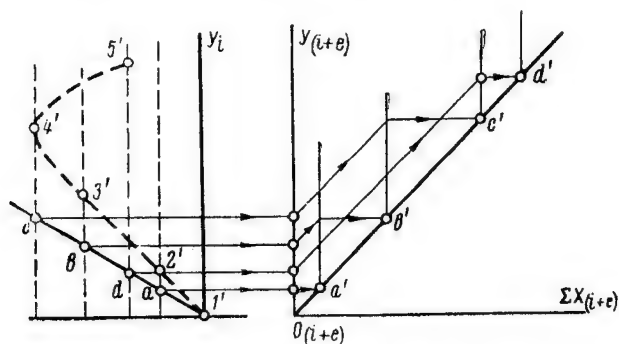


Рис. 11. К определению структуры и места включения гибкой связи

2. Предположим, что основная структура звена гибкой связи неизвестна и искомыми являются как место включения, так и структура и значения параметров связи.

Зададимся статической характеристикой связи и отложим ее в координатной системе звена i (рис. 11). Точки пересечения вертикалей, проведенных через точки $1'$, $2'$, $3'$, $4'$, $5'$ статической характеристики $\varphi_2(y_i)$, с выбранной статической характеристикой связи a , b , c , d снесем на ось ординат координатной системы звена гибкой связи $i+e$. Используя обратное построение в координатной системе звена гибкой связи, определим на статической характеристике звена точки a' , b' , c' , d' , соответствующие последовательным значениям координаты y_{i+e} (рис. 11). Дальнейший синтез звена ведется аналогично изложенному выше, т. е. выбрав угол наклона луча построений α_{i+e} , определяем обратным построением статическую характеристику входных воздействий $\varphi(y_{i+e})$ и по ней определяется рациональное место включения входа гибкой связи и форма статической характеристики связи корректирующего звена с его входной координатой.

Таким образом, если одним из изложенных путей удастся получить удовлетворительное решение, то задача синтеза звена оказывается полностью решенной, т. е. найдена структура звена, число связей, вид связей и места их включения. Кроме того, определены статические характеристики связей, позволяющие найти численные значения параметров связей.

Заметим кстати, что изложенным выше путем может производиться также синтез корректирующего устройства, осуществляющего воздействие по второй производной какой-либо из основных координат системы, если вид статической характеристики $\varphi_2(y_i)$ указывает на необходимость такого вида воздействия. При этом, пользуясь вторым путем, последовательно синтезируются два элементарных звена, из которых должна состоять корректирующая связь, и определяется место включения первого (входного) элементарного звена корректирующего устройства.

Допустим теперь, что попытка ограничить решение введением одной корректирующей связи по производной одной из координат не дала положительного результата, так как ни одно из получающихся решений не удовлетворяет требованиям физической осуществимости. В этом случае следует, выбрав наиболее благоприятную форму связи и ее статическую характеристику, определить статическую характеристику составляющей входных воздействий от этой связи и аналогично изложенному ранее выделить статическую характеристику дополнительной составляющей входных воздействий, по которой определять дополнительную корректирующую связь.

Перейдем теперь к рассмотрению более общего случая, когда элементарное звено имеет несколько прямых и обратных жестких связей.

Эквивалентная статическая характеристика входных воздействий элементарного звена, имеющего n воздействующих связей, может быть представлена в виде:

$$\varphi(y_i) = \varphi_1(y_i) + \varphi_2(y_i) + \dots + \varphi_n(y_i) = \varphi_0(y_i) + \varphi_u(y_i),$$

где

$\varphi_0(y_i)$ — эквивалентная статическая характеристика входных воздействий от уже определенных связей;

$\varphi_u(y_i)$ — эквивалентная статическая характеристика входных воздействий от искомой части связей.

Таким образом, искомая эквивалентная статическая характеристика входных воздействий определится как разность абсцисс соответственных точек характеристик $\varphi(y_i)$ и $\varphi_0(y_i)$:

$$\varphi_u(y_i) = \varphi(y_i) - \varphi_0(y_i).$$

Статическая характеристика $\varphi(y_i)$ определяется обратным построением, согласно изложенному выше.

Для определения статической характеристики $\varphi_0(y_i)$ значения функций, воздействующих на вход каждой связи, для последовательных

интервалов времени сносится на статические характеристики связей.

Так как:

$$\varphi_0(V_j) = \varphi_1(V_j) + \varphi_2(V_j) + \dots + \varphi_k(V_j),$$

то, произведя алгебраическое суммирование абсцисс соответствующих точек, определяющих значения входных воздействий каждой из K известных связей для одного и того же интервала времени, и снеся полученные значения результирующих воздействий на горизонталь соответственных значений координаты y_i , получим статическую характеристику $\mathcal{Z}_0(y_i)$.

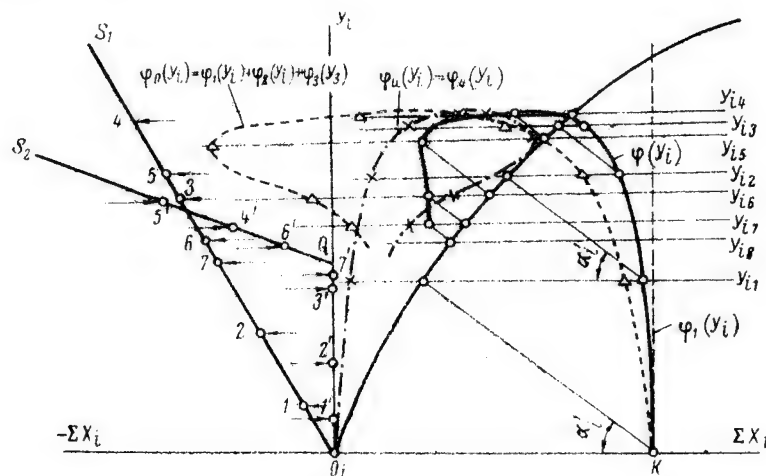


Рис. 12. Определение некоей статической характеристики входных воздействий (общий случай)

На рис. 12 приведено построение для случая, когда известной частью структуры элементарного звена является:

а) связь по независимой координате, являющейся постоянным возмущением;

б) жесткая связь по координате некоторого последующего звена со статической характеристикой, определяемой лучем $O_i S_1$;

в) жесткая связь по координате некоторого последующего звена, действующая с отсечкой, статическая характеристика которой изображается ломаной линией O_1QS_2 .

На рис. 12 точки 1, 2, 3, 4... на статической характеристике связи O_iS_1 и точки 1', 2', 3', 4'... на статической характеристике связи O_iQS_2 указывают последовательные значения составляющих входных воздействий от каждой связи для отдельных интервалов времени.

Мелким пунктиром на рис. 12 показана статистическая характеристика $\varphi_0(y_i) = \varphi_1(y_i) + \varphi_2(y_i) + \varphi_3(y_i)$, построенная по найденным

значениям составляющих. На этом же рисунке приведено нахождение обратным построением статической характеристики $\varphi(y_i)$, изображенной сплошной линией.

Определяя разности абсцисс кривых $\varphi(y_i)$ и $\varphi_0(y_i)$ и откладывая полученные значения от оси ординат, получаем статическую характеристику входных воздействий для искомой части структуры звена $\varphi_u(y_i)$, изображенную на рис. 12 штрих-пунктиром.

В общем случае

$$\varphi_u(y_i) = \varphi_{k+1}(y_i) + \varphi_{k+2}(y_i) + \dots + \varphi_n(y_i).$$

По найденной статической характеристике входных воздействий искомой части звена $\varphi_u(y_i)$ последовательное выделение составляющих $\varphi_{k+1}(y_i)$ и т. д., определение числа этих составляющих, вида и места включения, а также характеристик дополнительных корректирующих связей производится аналогично изложенному выше для простейшего звена.

8. Коррекция статических характеристик жестких связей и определение функции возмущения

При рассмотрении метода синтеза элементарного звена, приведенного в предыдущем параграфе, мы полагали, что статические характеристики жестких связей, выбранные на основании статического синтеза, полностью удовлетворяют поставленным требованиям динамики системы, и требуется лишь введение дополнительных корректирующих гибких связей. Однако такое предположение не всегда является справедливым, так как в ряде случаев может привести к более громоздким конструктивным решениям (введению лишних связей), а иногда и к физически неосуществимым решениям. В связи с этим при синтезе элементарных звеньев по динамическим характеристикам системы является возможной и целесообразной коррекция выбранных предварительно статических характеристик связей. Эта коррекция имеет целью:

а) попытаться добиться удовлетворения поставленным требованиям динамики с помощью выбранной структуры звена без введения дополнительных связей;

б) добиться путем изменения статических характеристик выбранных связей деформации статической характеристики входных воздействий искомой части $\varphi_u(y_i)$ таким образом, чтобы ее осуществление требовало минимального количества дополнительных связей при наибольшей простоте их физической осуществимости.

Коррекция статических характеристик жестких связей может производиться следующими путями:

1) изменением положения статической характеристики связи, что соответствует лишь изменению ее параметров при той же структуре;

2) изменением формы статической характеристики связи, что соответствует как изменению параметров, так и структуры связи (например, замене линейной связи — нелинейной);

3) введением дополнительной жесткой связи.

После того, как в рассматриваемом звене произведена желаемая коррекция статических характеристик жестких связей, необходимо по найденным новым статическим характеристикам произвести предварительную коррекцию статических характеристик жестких связей в предыдущих (по структуре) звеньях, после чего, если эта коррекция окажется удовлетворительной, продолжить дальнейший синтез.

В тех случаях, когда функция стороннего возмущения $f(t)$ не задана, последняя может также быть варьируемой координатой, что является существенным, особенно для входного звена и звеньев, имеющих связи, действующие с отсечками.

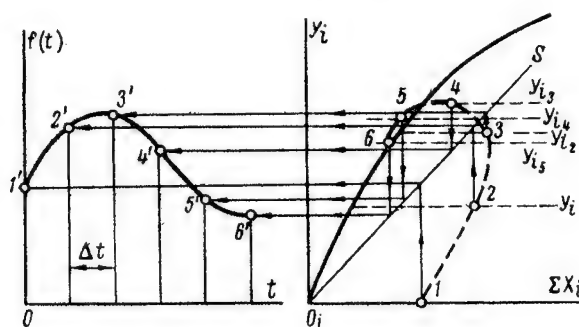


Рис. 13. К определению функции возмущения

Выбор надлежащей формы функции $f(t)$ позволяет, с одной стороны, облегчить достижение заданных динамических показателей у системы, с другой, — упростить структуру элементарного звена.

Полагая статическую характеристику связи по независимому возмущению заданной, а также известной предварительно выбранную структуру звена и характеристики связей, выделим по уже определенной части системы из эквивалентной статической характеристики входных воздействий $\varphi(y_i)$ составляющую искомой части $\varphi_u(y_i)$, полагая при этом, что в последнюю входит и составляющая от стороннего возмущения $f(t)$.

Снося по вертикалям полученные точки характеристики $\varphi_u(y_i)$ на статическую характеристику связи по стороннему возмущению, проведем из точек пересечения горизонтали в координатную систему $f(t) — t$ возмущающей функции до пересечения с вертикалями, соответствующими в этой координатной системе последовательным интервалам времени. Соединяя найденные таким образом точки плавной кривой, получим искомую зависимость $f(t)$.

На рис. 13 показан ход описанного выше построения. Точки 1, 2, 3, 4, 5, 6 определяют характеристику $\varphi_u(y_i)$, а точки 1', 2', 3', 4', 5', 6' в координатной системе $f(t) — t$ принадлежат искомой функции $f(t)$.

Если полученная функция $f(t)$ не является физически осуществимой или допустимой, то, выбрав теперь форму функции $f(t)$, исходя из условий физической осуществимости или допустимости, полагаем ее заданной и прямым построением выделяем из статической характеристики $\varphi_u(y_i)$ составляющую, обязанную функции $f(t)$.

Полученная новая статическая характеристика входных воздействий искомой части, определяемая разностью:

$$\varphi'_u(y_i) = \varphi_u(y_i) - \varphi_t(y_i),$$

может теперь служить основанием для коррекции статических характеристик выбранных связей или для синтеза дополнительных корректирующих связей.

9. О синтезе звеньев при наличии связей, обладающих нелинейными характеристиками

Основные нелинейности, встречающиеся в системах автоматического управления, можно разделить на три группы:

1. Нелинейности, связанные с видом статической характеристики элементарного звена.
2. Нелинейности, связанные с видом статических характеристик связей.
3. Нелинейности, связанные с видом функциональных воздействий на связи.

Нелинейности первой группы не вносят никаких усложнений при пользовании графическим методом как при анализе, так и при синтезе элементарного звена.

Нелинейности второй группы приводят к изменению параметров связи в зависимости от величины воздействующей на ее вход координаты. В свою очередь, изменение параметров связи вызывает изменение величины угла наклона луча построений α_i , так как:

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{\Delta t}{A_i} = \frac{\Delta t}{A_l + A_n},$$

где

- A_l — составляющая коэффициента A_i , включающая параметры связей с линейными характеристиками (неизменяемая часть);
 A_n — составляющая коэффициента A_i , включающая параметры связей с нелинейными характеристиками (изменяемая часть).

В связи с этим, при пользовании графическим методом при наличии у звена связей, обладающих нелинейными статическими характеристиками, как при анализе, так и при синтезе элементарного звена требуется дополнительная корректировка, связанная с изменением величины $\operatorname{tg} \alpha_i$.

Наконец, нелинейности третьей группы не влияют на наклон луча построений. Однако в этом случае как при анализе, так и при синтезе требуются дополнительные построения, связанные с отысканием необходимых функциональных воздействий на входе связи.

В связи с имеющимися особенностями построений при наличии нелинейности второй или третьей группы, рассмотрим подробнее отдельно синтез элементарного звена при наличии подобных связей.

А. Синтез элементарного звена при наличии связи, обладающей нелинейной статической характеристикой

Рассмотрим для простоты элементарное звено, у которого имеются лишь две связи: одна — линейная, от независимой координаты; другая — нелинейная, от некоторой основной координаты системы. Предположим также, что независимая координата представляет собой постоянное стороннее возмущение.

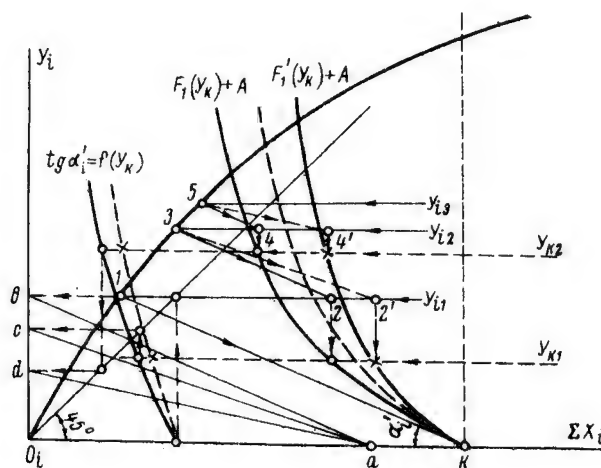


Рис. 14. К синтезу звена при наличии связи, обладающей нелинейной статической характеристикой

Отложив в координатной системе звена i его статическую характеристику и точку K на оси абсцисс, соответствующую установившемуся значению входных воздействий от прямой связи по независимой координате, проведем горизонталь, соответствующие последовательным значениям выходной координаты элементарного звена y_i , до пересечения с его статической характеристикой (рис. 14, точки 1, 3, 5). Соединив точку 1 с точкой K , определим начальное положение луча построений. (В иных вариантах структуры звена угол наклона лучей построений α'_i , определяется согласно изложенному ранее). Не меняя пока наклона луча построений, из точек 3, 5... проводим лучи до пересечения с горизонталями предыдущих состояний. Полученные точки 2, 4... совместно с точкой K определяют эквивалентную статическую характеристику входных воздействий $\varphi(y_i)$, являющуюся первым приближением.

Выбрав координату y_k в качестве входной координаты для обратной связи (о выборе места включения связи было сказано выше), проведем в квадранте рассматриваемого звена горизонтали соответствующие последовательным значениям координаты y_k . Точки 2, 4 ..., будучи снесены вертикалями на горизонтали соответствующих значений y_k , совместно с точкой K определяют статическую характеристику нелинейной связи $F_1(y_k)$.

Используя полученную характеристику, вычислим зависимость $\operatorname{tg} \alpha'_i = f(y_k)$ и отложим ее в той же координатной системе так, чтобы по оси абсцисс располагались значения $\operatorname{tg} \alpha'_i$, а по оси ординат — координаты y_k .

Для удобства дальнейших построений проведем вспомогательный луч из начала координат под углом 45° .

Выбрав на оси абсцисс произвольную точку a , отложим контрольный луч ab , параллельный лучу построений при выбранном начальном значении угла наклона α_i .

Продолжая горизонталь, соответствующую первому значению координаты y_k , до пересечения с характеристикой $\operatorname{tg} \alpha'_i = f(y_k)$, найденную точку с помощью вспомогательного луча перенесем на ось ординат. Соединяя полученную точку C с точкой a , определим наклон луча построений для второго интервала времени с учетом изменения параметров обратной связи. Проводя теперь из точки 3 луч, параллельный линии ac , до пересечения с горизонталью предыдущего состояния, найдем точку $2'$, которая будучи снесена на соответствующую горизонталь y_{k1} определит новую точку статической характеристики с учетом введенных поправок.

Проведя аналогичные построения для последующих интервалов времени, определим все точки новой статической характеристики связи $F'_1(y_k)$, соответствующей второму приближению. Так как этой характеристике соответствуют иные параметры связи, то можно, вычислив по ним второе приближение характеристики $\operatorname{tg} \alpha'_i = f(y_k)$, вновь провести указанные несложные построения, найдя третье приближение.

Однако с достаточной для практики точностью, не проводя дальнейших вычислений, за искомую статическую характеристику нелинейной связи можно принять среднюю линию, лежащую между характеристиками $F_1(y_k) + A$ и $F'_1(y_k) + A$ (пунктирная линия на рис. 14).

Б. Синтез элементарного звена при наличии нелинейностей, связанных с видом функциональных воздействий на связи

Для пояснения метода синтеза элементарного звена при наличии нелинейностей, связанных с видом функциональных воздействий на связи, рассмотрим типичный для систем автоматического управления случай связи, осуществляющей воздействие в функции произведения двух координат.

Выделив согласно изложенному выше составляющую статической характеристики входных воздействий искомой части $\varphi_u(y_i)$, отложим ее в координатной системе $y_i - \Sigma x_i$ рассматриваемого звена и проведем вертикали через точки 1, 2, 3, 4 ... характеристики, соответствующие значениям $\varphi_u(y_i)$ для последовательных интервалов времени (рис. 15).

Выбрав, далее, одну из координат системы y_s за один из предполагаемых сомножителей, проведем горизонтали, соответствующие последовательным значениям координаты y_s , и определим точки пересечения их с соответственными вертикалями (точки 1', 2', 3', 4' ... на рис. 15).

Через найденные точки 1', 2', 3', 4' из начала координат проведем лучи, которые будут представлять собой последовательные

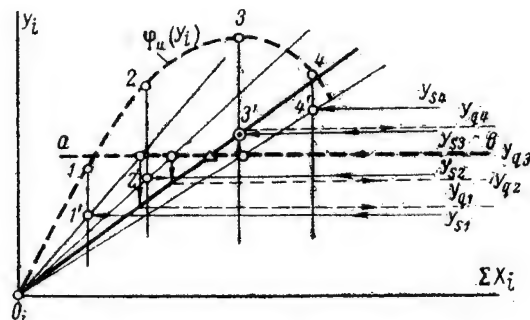


Рис. 15. К синтезу звена при наличии связи с нелинейным функциональным воздействием (произведение двух координат)

положения статической характеристики связи. Будем теперь искать координату, представляющую собой второй сомножитель. Для этого выберем одну из статических характеристик связи за основную.

(На рис. 15 основная характеристика, проведенная жирной линией, соответствует третьему интервалу времени. Выбор характеристики произволен и диктуется лишь удобствами масштаба построения). Проведем горизонталь ab , соответствующую значению координаты y_q , предполагаемой в качестве второго сомножителя, для того же интервала времени (y_{q3}).

Точки пересечения статических характеристик связи, построенных для отдельных интервалов времени, с линией ab , будучи спроецированы на основную характеристику $0_i - 3'$, укажут потребные значения координаты y_q для этих интервалов времени. Если полученные значения координаты y_q совпадают с истинными или близки к ним, то выбор координат произведен правильно.

Так как необходимые построения весьма элементарны, то, производя вариации координат в качестве сомножителей, не представляет труда определить искомое решение, если таковое принципиально возможно.

В заключение заметим, что указанными путями могут определяться характеристики и места включения для иных форм нелинейных связей, при внесении соответствующих изменений в графические построения.

10. Определение параметров связей

В процессе графического синтеза элементарного звена определяются: структура звена, число и место включения управляющих и стабилизирующих связей, статические характеристики связей и угол наклона луча построений.

Численные значения параметров связей могут быть определены на основании простейших соотношений, связывающих параметры системы с углами наклона статических характеристик связей и луча построений.

Обращаясь к обобщенному уравнению элементарного звена (1), нетрудно установить эту связь.

Уравнения статических характеристик простейших связей будут иметь вид:

$$F_i(t) = k_1 \cdot f(t);$$

$$F_k(y_k) = k_2 \cdot y_k;$$

$$F_e(y_e) = f(y_e) \cdot y_e.$$

$$\begin{aligned} & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \\ & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \end{aligned}$$

Отношение входной координаты каждой связи к ее воздействию на выходе будет представлять собой тангенс угла наклона статической характеристики связи по отношению к оси абсцисс в данной точке, т. е.:

$$\frac{f(t)}{F_i(t)} = \frac{1}{k_1} = \operatorname{tg} \beta_1 = \operatorname{const};$$

$$\frac{y_k}{F_k(y_k)} = \frac{1}{k_2} = \operatorname{tg} \beta_2 = \operatorname{const};$$

$$\frac{y_e}{F_e(y_e)} = \frac{1}{f(y_e)} = \operatorname{tg} \beta_3 = \operatorname{var}.$$

$$\begin{aligned} & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \\ & \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \end{aligned}$$

Коэффициенты $\frac{1}{k_1}$; $\frac{1}{k_2}$; $\frac{1}{f(y_e)}$; ... включают в себя лишь параметры каждой связи, причем в первых двух эти параметры постоянны, так как статические характеристики связей линейны, а третий коэффициент включает в себя переменные параметры нелинейной характеристики связи.

Вводя в рассмотрение геометрические значения углов наклона статических характеристик связей (рис. 16) и масштабные коэффициенты, получим окончательные расчетные выражения:

$$\begin{aligned}\operatorname{tg} \beta_1 &= \operatorname{tg} \beta'_1 \cdot \frac{m_t}{m_x}; \\ \operatorname{tg} \beta_2 &= \operatorname{tg} \beta'_2 \cdot \frac{m_{yk}}{m_x}; \\ \operatorname{tg} \beta_3 &= \operatorname{tg} \beta'_3 \cdot \frac{m_{ye}}{m_x}.\end{aligned}\quad (7)$$

С другой стороны, тангенс угла наклона луча построений равен:

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{\Delta t}{A_i},$$

где

$$A_i = a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n.$$

Коэффициенты $a_1; a_2; \dots a_n$ зависят от параметров звена и связей, причем некоторые из этих коэффициентов являются известными,

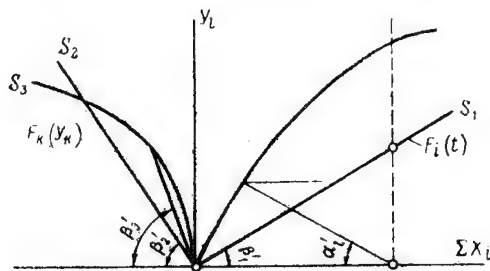


Рис. 16. К определению параметров связей

так как параметры звена и части связей (основных) являются заданными величинами.

Переходя к геометрическому значению тангенса угла (рис. 16) и вводя масштабные коэффициенты, получим:

$$\operatorname{tg} \alpha'_i = \operatorname{tg} \alpha_i \cdot \frac{m_{xi}}{m_{yi}} = \frac{\Delta t}{A_i} \cdot \frac{m_{xi}}{m_{yi}},$$

откуда:

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n = \frac{\Delta t}{\operatorname{tg} \alpha'_i} \cdot \frac{m_{xi}}{m_{yi}}. \quad (8)$$

Наконец, между коэффициентами a_k и углами наклона соответствующих статических характеристик связей существует простая

связь, определяемая соотношениями:

$$\begin{aligned}\frac{a_1}{\operatorname{tg} \beta_1} &= n_1; \\ \frac{a_2}{\operatorname{tg} \beta_2} &= n_2; \\ \frac{a_3}{\operatorname{tg} \beta_3} &= n_3; \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ &\cdot \quad \cdot \quad \cdot\end{aligned}\quad (9)$$

где n_k — постоянные коэффициенты, зависящие от параметров звена и части параметров связи.

Таким образом, на основании простейших геометрических соотношений, получаемых из чертежа, используя соотношения (7), (8), (9) и задаваясь оптимальными значениями части параметров связей, не представляет особых затруднений определить все численные значения параметров звена и связей, входящих в его структуру.

Заключение

Графический метод синтеза, предложенный в настоящей работе, является обобщенным, пригодным для весьма широкого класса систем автоматического управления и регулирования. Метод одинаково пригоден как для замкнутых и разомкнутых систем автоматического регулирования или управления, так и для построенных по комбинированному принципу.

Метод позволяет производить синтез систем при больших отклонениях с учетом нелинейностей статических характеристик элементарных звеньев систем, статических характеристик связей системы и нелинейностей функциональных воздействий, имеющих место в системе.

Поскольку метод является приближенным, то он был подвергнут расчетной и экспериментальной проверке на конкретных примерах систем 2, 3, 4 и 5 порядков. Расчетная и экспериментальная проверка показала достаточно высокую практическую точность метода, его наглядность и простоту.

Излагаемый в настоящей статье в общем виде метод синтеза доведен до инженерных форм, позволяющих их непосредственное применение на практике для решения конкретных инженерных задач.

Для иллюстрации ниже приводятся результаты одного из примеров графического синтеза системы автоматического регулирования четвертого порядка.

Синтезировалась система регулирования скорости электродвигателя постоянного тока небольшой мощности, питаемого по системе генератор-двигатель.

На систему были наложены следующие условия:

а) при набросах и сбросах нагрузки система должна обеспечивать поддержание постоянства заданной скорости $n=1200$ об/мин с точностью $0,1\%$;

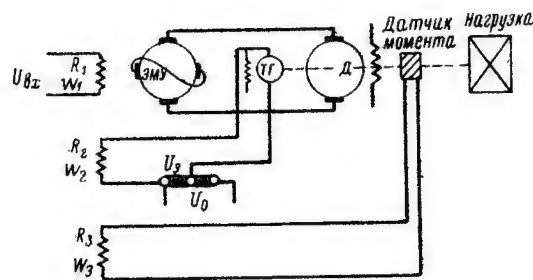


Рис 17. Принципиальная схема синтезированной системы регулирования

б) переходный процесс при набросе и сбросе нагрузки может быть колебательным, но не должен содержать более двух колебаний;

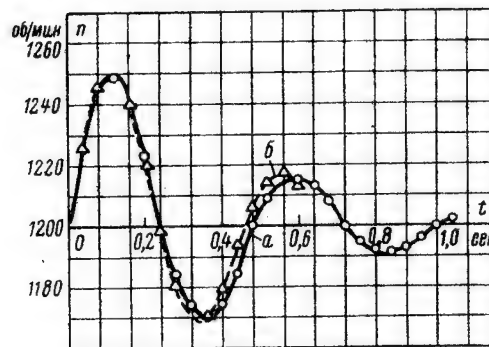


Рис. 18. Заданная и расчетная характеристики переходного процесса синтезированной системы регулирования

в) максимальное отклонение скорости от заданного значения при набросе и сбросе нагрузки, близкой к номинальной, не должно превышать 5% ;

г) через $0,7$ сек отклонение скорости от заданного значения не должно превышать 1% ;

д) двигатель включается на постоянную нагрузку.

Система синтезировалась по заданному колебательному переходному процессу, удовлетворяющему поставленным условиям. При синтезе в качестве двигателя была принята машина постоянного тока типа ПН-45, а в качестве генератора — ЭМУ-25/3000.

В результате синтеза была получена комбинированная система регулирования, приведенная на рис. 17, имеющая управляющие связи по скорости (по отклонению регулируемой величины) с встречным напряжением в цепи связи и по моменту (по возмущению). При синтезе были приняты во внимание также внутренние нелинейные

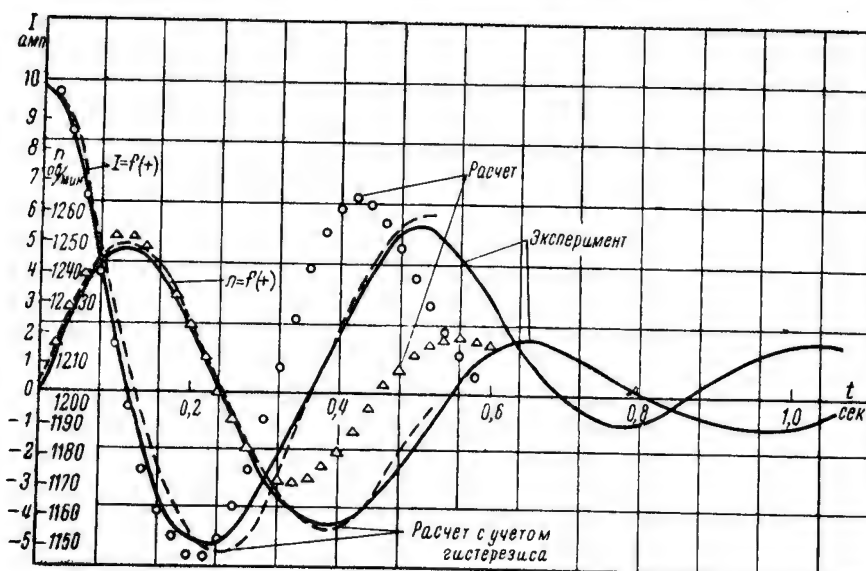


Рис. 19. Экспериментальные и расчетные характеристики переходных процессов синтезированной системы регулирования

связи ЭМУ от тока поперечной цепи, учитывающие размагничивающее действие реакции якоря и коммутирующих секций.

По выбранным параметрам и характеристикам системы графическим методом [1] был произведен расчет переходного процесса в спроектированной системе. На рис. 18 приведено сравнение исходной кривой переходного процесса с полученной расчетом у спроектированной системы (а — исходная, б — расчетная).

На рис. 19 приведено сравнение расчетных и экспериментальных характеристик переходных процессов в системе (рассматривался сброс нагрузки). Существенное расхождение между расчетными и экспериментальными характеристиками, обусловленное гистерезисом ЭМУ, намечается лишь после одного полупериода колебаний. Расчетные характеристики, полученные с учетом гистерезиса, дают полное совпадение с экспериментальными.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Башарин, Графический метод расчета переходных процессов в автоматизированном электроприводе, ЛЭТИ — Ленгосуниверситет, 1956.
2. А. В. Башарин, Графический расчет переходных процессов в системах каскадного возбуждения электрических машин с обратными связями и нелинейностями, Вестник электропромышленности, № 5, 1956.
3. А. В. Башарин, Г. Л. Ульман, Графоаналитический метод расчета переходных процессов при регулировании э.д.с. генератора постоянного тока, Сборник „Электросила“, № 12, 1954.

Поступила в январе 1957 г.

Докт. техн. наук, проф. Н. П. ЕРМОЛИН

СТАБИЛИЗАЦИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ МАЛОМОЩНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Введение

Стабилизация скорости вращения маломощных электродвигателей постоянного тока в настоящее время широко применяется в специальных установках и объектах. Мощность таких двигателей колеблется от нескольких единиц до нескольких сотен ватт. Для стабилизации скорости вращения их обычно используется плоский центробежный вибрационный регулятор, периодически включающий

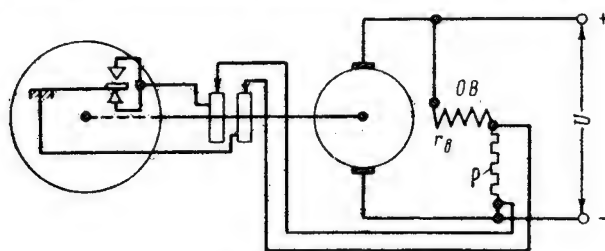


Рис. 1. Схема двигателя с регулятором

при размыкании своих вибрирующих контактов добавочное сопротивление или в цепь возбуждения (рис. 1), или в цепь якоря. Регулируемый двигатель, как правило, имеет параллельное возбуждение, хотя встречаются и схемы двигателей с последовательным возбуждением.

Как известно, плоский вибрационный регулятор скорости вращения выполняется в виде диска на валу регулируемого двигателя с жестко закрепленной на нем плоской упругой пружиной с контактом на ее конце (рис. 2). Этот контакт при вращении регулятора вибрирует вместе с пружиной и периодически касается другого неподвижного на диске установочного контакта. Последний

в электрическом отношении изолирован от диска. Пружина и установочный контакт соединены с двумя контактными кольцами, на которых расположены щетки для соединения зажимов добавочного сопротивления в цепи возбуждения с контактами регулятора (рис. 1). При замкнутых контактах регулятора это сопротивление шунтируется, при разомкнутых — включается последовательно в цепь. При вибрации контактов регулятора в установившемся режиме сопротивление цепи возбуждения двигателя скачкообразно совершает

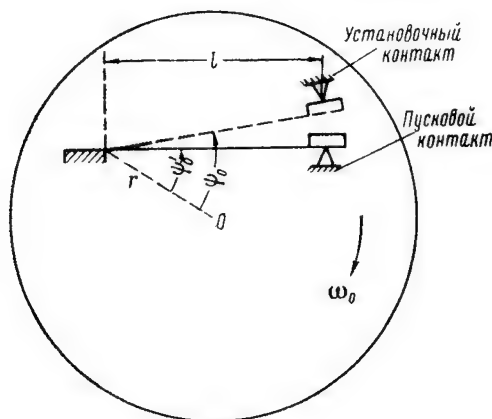


Рис. 2. Вибрационный регулятор

периодические колебания от значения $r_в$ до величины $r_в + \rho$ около некоторого среднего эффективного значения этого сопротивления с частотой автоколебаний [2, 3]:

$$r_{эф} = r_в + \tau_p \cdot \rho, \quad (1)$$

где

$r_в$ — сопротивление обмотки возбуждения;

ρ — добавочное сопротивление в цепи возбуждения (рис. 1);

$\tau_p = \frac{t_p}{t_p + t_a}$ — относительная разомкнутость контактов регулятора;

t_a и t_p — время замкнутого и разомкнутого состояний его контактов.

Эффективное сопротивление $r_{эф}$ определяет среднее значение тока возбуждения, обеспечивающего стабилизируемую скорость вращения двигателя при данном режиме работы. При изменении этого режима постоянство скорости вращения двигателя поддерживается автоматическим изменением относительной разомкнутости контактов регулятора τ_p , способствующим соответствующему изменению эффективного сопротивления цепи возбуждения $r_{эф}$. Относительная разом-

кнутость контактов τ_p в предельных режимах работы изменяется от значения $\tau_p \approx 0$ — при работе двигателя вхолостую и наибольшем напряжении на его зажимах до величины $\tau_p \approx 1$ — при работе его под полной нагрузкой и наименьшем напряжении.

В процессе стабилизации скорости вращения электродвигателя центробежным вибрационным регулятором имеют место периодические отклонения скорости, тока якоря, тока возбуждения и других величин от их средних значений. Изменения этих отклонений можно представить определенной системой дифференциальных уравнений, поэтому целью настоящей работы является составление и анализ решения уравнений переходных процессов при стабилизации скорости вращения электродвигателя параллельного возбуждения путем воздействия вибрационного регулятора на цепь возбуждения его (рис. 1).

Уравнения переходных процессов при стабилизации скорости вращения электродвигателя параллельного возбуждения путем периодического включения добавочного сопротивления в цепь возбуждения центробежным регулятором

Для получения линейных дифференциальных уравнений рассматриваемых переходных процессов нужно допустить, что кривая намагничивания электродвигателя в рабочей точке заменяется касательной (рис. 3), индуктивность цепи возбуждения его при колебаниях тока возбуждения практически остается постоянной и напряжение источника постоянного тока имеет неизменное значение. При этих допущениях результирующий полезный поток полюса при колебаниях тока возбуждения в процессе замыкания и размыкания добавочного сопротивления в цепи возбуждения двигателя вибрационным регулятором можно с достаточным приближением представить так (рис. 3):

$$\Phi = \Phi_0 + k_b I_b - k_a I_a, \quad (2)$$

где

Φ_0 — постоянная составляющая потока, отсекаемая на оси ординат касательной к кривой намагничивания в точке среднего значения результирующего полезного потока полюса, в максвеллах (рис. 3);

$k_b = \left(\frac{1 - \epsilon_0}{1 - \epsilon} \right) \cdot \frac{\Phi_a}{I_b}$ [мксв/а] — постоянный коэффициент, характеризующий наклон касательной к кривой намагничивания (рис. 3);

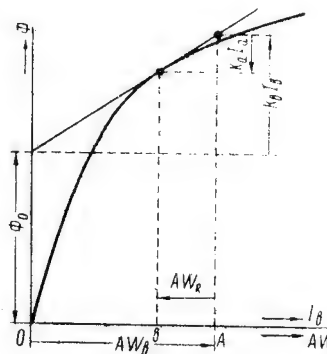


Рис. 3. Кривая намагничивания двигателя

$k_a = \frac{\varepsilon(1-\varepsilon_0)}{1-\varepsilon} \cdot \frac{\Phi_a}{I_a} [\text{мксв/а}]$ — постоянный коэффициент, характеризующий размагничивающее действие реакции якоря на поле полюсов;
 Φ_a — номинальный результирующий полезный поток полюса в максвеллах;

при этом

I_b и I_a — средние значения токов возбуждения и якоря в амперах,

$$\varepsilon = \frac{AW_R}{AW_b}; \quad \varepsilon_0 = \frac{\Phi_0}{\Phi_a};$$

AW_R — суммарная м. д. с. поперечной, продольной и коммутационной реакции якоря при номинальном токе его на пару полюсов;

$AW_b = 2W_b I_b$ — м. д. с. возбуждения на пару полюсов, соответствующая среднему току возбуждения.

При установившемся режиме работы двигателя с центробежным вибрационным регулятором в цепи возбуждения уравнения равновесия э. д. с. и моментов на валу и скорости вращения системы двигатель-регулятор для средних величин, с учетом уравнения (2) и [2], будут:

$$\left. \begin{aligned} U &= c\omega_0 \Phi + I_a(r_a + r_m); \\ U - I_b r_{b\partial\phi} &= 0; \\ \Phi &= \Phi_0 + k_b I_b - k_a I_a; \\ \Phi' &= \Phi + \lambda_{s1s} AW_b = \Phi \left(1 + \lambda_{s1s} \frac{2W_b}{k_b} \right) + \\ &\quad + \lambda_{s1s} \cdot \frac{2W_b k_a}{k_b} I_a - \lambda_{s1s} \frac{2W_b}{k_b} \Phi_0; \\ c\Phi I_a - 9,81 \cdot M_c &= 0; \quad M_c = M_0 + k\omega; \\ r\omega_0^2 \cdot \sin \psi_0 &= \omega_0^2 \cdot l(\psi_0 - \psi'_0). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

При стабилизации скорости вращения двигателя скорость, токи якоря и возбуждения, результирующий магнитный поток и т. д. при вибрации подвижного контакта регулятора совершают небольшие периодические отклонения $\Delta\omega'$, $\Delta i'_a$, $\Delta i'_b$, $\Delta\varphi'$, $\Delta\varphi''$, $\Delta\psi'$ и $\Delta r'_{b\partial\phi}$ от их постоянных средних значений. В связи с этим уравнения (3), с учетом [2, 3], в этом режиме примут следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} U &= c(\omega_0 + \Delta\omega')(\Phi + \Delta\varphi') + (I_a + \Delta i'_a)(r_a + r_m) + L_a \frac{d\Delta i'_a}{dt}; \\ U - (I_b + \Delta i'_b)(r_{b\partial\phi} + \Delta r'_{b\partial\phi}) - \omega_b \frac{d\Delta\varphi''}{dt} &= 0; \\ \Phi + \Delta\varphi' &= \Phi_0 + k_b(I_b + \Delta i'_b) - k_a(I_a + \Delta i'_a); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \Phi' + \Delta\varphi'' &= (\Phi + \Delta\varphi') \left((1 + \lambda_s \gamma_s \frac{2W_b}{k_b}) + \lambda_s \gamma_s \frac{2W_b k_a}{k_b} \times \right. \\
 &\quad \times (I_a + \Delta i_a') - \lambda_s \gamma_s \frac{2W_b}{k_b} \Phi_0; \\
 9,81 \cdot 0 \frac{d\Delta\omega'}{dt} &= c (\Phi + \Delta\varphi') (I_a + \Delta i_a') - 9,81 \times \\
 &\quad \times M_0 - 9,81 \cdot k (\omega_0 + \Delta\omega'); \\
 \frac{d^2 \Delta\psi'}{dt^2} - \frac{r}{l} (\omega_0 + \Delta\omega')^2 \cdot \sin(\psi_0 + \Delta\psi') &= -\gamma_0^2 (\psi_0 + \Delta\psi' - \psi_0).
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Периодическую прямоугольную кривую изменения во времени сопротивления цепи возбуждения двигателя от значения r_b до величины $(r_b + \rho)$ при замыканиях и размыканиях контактов регулятора с угловой частотой автоколебаний (рис. 4) аналитически можно представить в относительных единицах следующим приближенным тригонометрическим рядом [2]:

$$\begin{aligned}
 \Delta r_{b \text{ вф}}(t) &= \frac{\Delta r'_{b \text{ вф}}}{r_{b \text{ вф}0}} = a_0 - \\
 &- \frac{2a}{\pi} (1 - \cos \omega_a t_3) \sin \omega_a t - \\
 &- \frac{a}{\pi} (1 - \cos 2\omega_a t_3) \cdot \sin 2\omega_a t + \\
 &+ \frac{2a}{3\pi} (1 - \cos 3\omega_a t_3) \cdot \sin 3\omega_a t,
 \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$a = \frac{\rho}{2r_{b \text{ вф}0}}; \quad a_0 = \frac{\rho(1 - 2\tau_p)}{2r_{b \text{ вф}0}} \quad (5a)$$

и номинальное эффективное сопротивление цепи возбуждения:

$$r_{b \text{ вф}0} = r_b + 0,5 \rho \quad [\text{ом}].$$

Так как отклонения всех переменных величин в системе уравнений (4) от их средних значений при стабилизации скорости вращения двигателя практически оказываются относительно малыми, то при преобразовании уравнений (4) можно без большой погрешности пренебречь произведением и квадратом этих малых величин и произведением их на производные от них. Тогда, вычитая из уравнений (4) уравнения (3), затем поделив первые два из них на номинальную э. д. с. якоря $E_n = c\omega_0 \Phi_a$, вторые два — на номинальный поток Φ_a , пятое — на номинальный вращающий момент двигателя $M_n = c\Phi_a \cdot I_a$ и шестое — на угол ψ_0 и далее преобразовав, получим следующую систему уравнений переходных процессов в относительных единицах при стабилизации скорости вращения

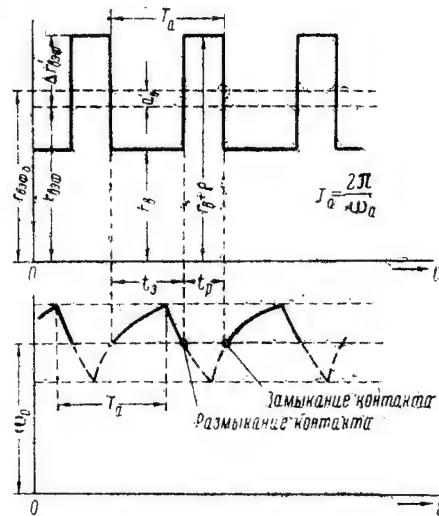


Рис. 4. Колебания сопротивления цепи возбуждения и скорости вращения при работе вибрационного регулятора

рассматриваемого двигателя посредством центробежного регулятора в цепи возбуждения:

$$\left. \begin{aligned} T_a \frac{d \Delta i_a}{dt} + \varepsilon_a \cdot \Delta i_a + \Delta \varphi + \Delta \omega &= 0; \\ T_{bR} \frac{d \Delta i_a}{dt} + T_b \frac{d \Delta \varphi}{dt} + \varepsilon_{bR} \cdot \Delta i_a + \varepsilon'_b \Delta \varphi &= \varepsilon_b \cdot \Delta r_{b \text{ эф}}(t); \\ T_{\text{ж}} \frac{d \Delta \omega}{dt} - \Delta i_a - \Delta \varphi + \varepsilon_{\text{ж}} \Delta \omega &= 0; \\ \frac{d^2 \Delta \psi}{dt^2} + \gamma^2 \cdot \Delta \psi &= b \cdot \Delta \omega; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

при этом по неполному уравнению (5):

$$\Delta r_{b \text{ эф}}(t) = a_0 - \frac{2a}{\pi} (1 - \cos \omega_a t_n) \cdot \sin \omega_a t, \quad (7)$$

где:

Δi_a , $\Delta \varphi$, $\Delta \omega$ и $\Delta \psi$ — относительные величины отклонений тока якоря, результирующего потока, угловой скорости вращения и угла колебания пружины регулятора от соответствующих средних установившихся значений их, выраженные в долях номинальных значений I_a , Φ_a , ω_0 и ψ_0 ;

относительные падения напряжения при номинальных условиях:

$$\varepsilon_a = \frac{I_a r_a + \Delta U_{\text{ш}}}{E_n}; \quad \varepsilon_{bR} = \frac{k_a r_{b \text{ эф}} \cdot I_a}{k_b E_n}; \quad \varepsilon_b = \frac{U}{E_n}; \quad \varepsilon'_b = \frac{r_{b \text{ эф}}}{c k_b \omega_0}; \quad (8a)$$

относительная величина переменной составляющей нагрузочного момента на валу двигателя при номинальных условиях:

$$\varepsilon_{\text{ж}} = \frac{9,81 \cdot k \omega_0}{c \Phi_a I_a}; \quad (8b)$$

постоянные времени при номинальных условиях в секундах:

$$\left. \begin{aligned} T_a &= \frac{L_a I_a}{E_n}; \quad T_b = \frac{2p W_b \left(1 + \lambda_s \tilde{\gamma}_s \frac{2W_b}{k_b} \right) \cdot \Phi_a \cdot 10^{-8}}{E_n}; \\ T_{bR} &= \frac{2p W_b \lambda_s \tilde{\gamma}_s \frac{2W_b k_a}{k_b} \cdot I_a \cdot 10^{-8}}{E_n}; \quad T_{\text{ж}} = \frac{GD^2 \cdot \omega_0}{4c \Phi_a I_a}; \end{aligned} \right\} \quad (8b)$$

угловая частота собственных колебаний пружины регулятора с грузом под влиянием упругости ее при вращении регулятора со стабилизируемой скоростью:

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \sqrt{\gamma_0^2 - \frac{r}{l} \cos \psi_0 \cdot \omega_0^2}; \\ b &= 2 \frac{r}{l} \cdot \omega_0^2 \cdot \frac{\sin \psi_0}{\psi_0}; \end{aligned} \right\} \quad (8r)$$

при этом:

γ_0 — угловая частота собственных колебаний идеальной системы пружины регулятора с грузом в 1/сек. [2];

$\omega_0 = \frac{2\pi n}{60}$ — стабилизируемая угловая скорость вращения двигателя в 1/сек;

r и l — радиус от центра вращения вала до места закрепления пружины и длина последней (рис. 3);

ψ_0 — угол между радиусом r и пружиной в момент замыкания контактов регулятора в радианах.

Угловая частота автоколебаний пружины регулятора в уравнении (7) может быть представлена в следующем виде [3]:

$$\omega_{a1,2} = \sqrt{\frac{Q}{2} \pm \sqrt{\frac{Q^2}{4} - R}}, \quad (8)$$

где

$$Q = \left(1 + \varepsilon'_b \frac{T_a}{T_b}\right) \gamma^2; \quad R = \left(\frac{1 - \varepsilon_a}{T_M} + \frac{\varepsilon_a \varepsilon'_b}{T_b}\right) \frac{\gamma^2}{T_a}. \quad (8a)$$

Уравнение (8) показывает, что автоколебания пружины регулятора в общем случае могут быть двух видов: колебания с приблизительно собственной частотой пружины ω_{a1} и колебания низкой частоты ω_{a2} . Однако отклонения скорости вращения якоря двигателя от ее среднего установившегося значения из-за механической инерции якоря не успевают следовать за частотой собственных колебаний пружины регулятора и совершаются практически в соответствии с низкой частотой автоколебаний пружины ω_{a2} .

В системе уравнений (6) можно получить сначала решение первых трех уравнений относительно $\Delta\omega$, а затем решение четвертого уравнения. Первые три уравнения системы (6) удобно решить операторным методом с учетом начальных условий: в момент $t=0$: $\Delta i_a(0)=0$; $\Delta\varphi(0)=0$; $\Delta\omega(0)=\gamma$, тогда, после преобразования этих уравнений, с учетом уравнений (7) и (8), получается:

$$\Delta\omega = \frac{\gamma p^3 + Dp^2 + Ep + K}{p^3 + Ap^2 + Bp + C} + \frac{Mp^2 + Np}{(p^3 + Ap^2 + Bp + C)(p^2 + \omega_a^2)} = \frac{F_1(p)}{H(p)} + \frac{F_2(p)}{H(p)}, \quad (9)$$

где постоянные коэффициенты знаменателя уравнения (9) имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{(\varepsilon_a T_M + \varepsilon_M T_a) T_b + (\varepsilon'_b T_a - T_{bR}) T_M}{T_a T_b T_M}; \\ B &= \frac{(\varepsilon'_b T_a + \varepsilon_a T_b) \varepsilon_M + (\varepsilon_a \varepsilon'_b - \varepsilon_{bR}) T_M + T_b - (1 + \varepsilon_M) T_{bR}}{T_a T_b T_M}; \\ C &= \frac{(\varepsilon'_b - \varepsilon_{bR}) + (\varepsilon_a \varepsilon'_b - \varepsilon_{bR}) \varepsilon_M}{T_a T_b T_M}. \end{aligned} \right\} \quad (9a)$$

Применяя теорему разложения к уравнению (9), получим следующую зависимость во времени отклонения угловой скорости вращения якоря от ее среднего установившегося значения:

$$\Delta\omega = \zeta + \gamma_0 \sin(\omega_a t + \delta) + \gamma'_0 e^{\lambda t} \cdot \sin(qt + \chi) + \gamma_1 e^{s_1 t}, \quad (10)$$

где

$$\zeta = \frac{(1 - \varepsilon_a) \varepsilon_b \cdot a_0}{(\varepsilon'_b - \varepsilon_{bR}) + (\varepsilon_a \varepsilon'_b - \varepsilon_{bR}) \varepsilon_M} \text{ — установившееся значение отклонения угловой скорости вращения якоря от стабилизируемой величины ее } \omega_0 \text{ в долях этой величины;}$$

$\gamma_0, \gamma'_0, \gamma_1$ и δ, χ — амплитуды и фазы составляющих отклонения угловой скорости от установившегося значения ее,

s_1, λ и q — корни характеристического уравнения:

$$p^3 + Ap^2 + Bp + C = 0. \quad (10a)$$

Уравнение (10) показывает, что отклонения угловой скорости вращения якоря $\Delta\omega$ от среднего установившегося значения ее характеризуются постоянной составляющей этого отклонения ζ от стабилизируемой скорости, незатухающими колебаниями с амплитудой γ_0 и угловой частотой ω_a и двумя составляющими свободных колебаний якоря, которые обычно являются затухающими. Таким образом, в период установившегося движения системы двигатель-регулятор указанные отклонения угловой скорости вращения якоря будут:

$$\Delta\omega = \zeta + \gamma_0 \sin(\omega_a t + \delta). \quad (11)$$

В этом случае четвертое уравнение системы (6), с учетом уравнения (11), примет следующий вид:

$$\frac{d^2 \Delta\psi}{dt^2} + \nu^2 \cdot \Delta\psi = \zeta b + \gamma_0 b \cdot \sin(\omega_a t + \delta). \quad (12)$$

Решение этого уравнения методом вариаций произвольных постоянных получается следующего вида:

$$\Delta\psi = \mu + \mu_0 \sin(\omega_a t + \delta) + \mu'_0 \sin(\nu t + \eta), \quad (13)$$

где

$$\mu = \frac{b\zeta}{\nu^2}; \quad \mu_0 = \frac{b\gamma_0}{\nu^2 - \omega_a^2}; \quad \mu'_0 = -\frac{\xi_1}{\sin \eta}; \quad \operatorname{tg} \eta = -\frac{\xi_1 \cdot \nu}{h - \xi_2}; \quad (13a)$$

$$\xi_1 = \mu + \mu_0 \sin \delta; \quad \xi_2 = \mu_0 \omega_a \cos \delta; \quad h = \left(\frac{d\Delta\psi}{dt} \right)_{t=0} = \frac{\gamma \varepsilon_M \left(1 + \frac{r^2}{l^2} - 2 \frac{r}{l} \cos \psi_0 \right)}{2T_M \frac{r}{l} \psi_0 \sin \psi_0}.$$

Анализ решения уравнений процессов стабилизации скорости вращения двигателя и условий устойчивой работы его

Как уже указывалось, две последних составляющих свободных колебаний якоря в уравнении (10) обычно являются затухающими. Это будет в том случае, когда показатели степени последних двух членов данного уравнения λ и s_1 меньше нуля. В этом случае режим работы двигателя при стабилизации скорости вращения его посредством центробежного вибрационного регулятора в цепи возбуждения будет устойчивым, и отклонения скорости вращения его от среднего установившегося значения будут характеризоваться первыми двумя членами уравнения (10) или уравнением (11). При этом угловая частота этих колебаний ω_a будет соответствовать низкочастотным автоколебаниям пружины регулятора, определяемым уравнением (8) при знаке минус в подкоренном выражении.

При $\lambda = 0$ или $\lambda > 0$ — режим работы двигателя будет неустойчивым и отклонения скорости вращения его от среднего установившегося значения будут характеризоваться первыми тремя членами уравнения (10). Постоянная составляющая отклонения скорости вращения ζ в уравнениях (10) и (11) от стабилизируемого значения обусловлена тем, что в общем случае относительная разомкнутость контактов регулятора τ_p отличается от величины 0,5 и составляет $\tau_p \leq 0,5$. При условии $\tau_p = 0,5$ составляющая $\zeta = 0$, так как в этом случае по уравнению (5а) $a_0 = 0$.

Режим работы двигателя будет также неустойчивым, если показатель степени в последнем члене уравнения (10) $s_1 > 0$. Как показывает анализ уравнения (10а), это будет иметь место при условии, когда свободный член его $C < 0$. По третьему уравнению (9а) такое состояние возможно только при весьма значительном относительном влиянии реакции якоря на поле полюсов $\epsilon_{\delta R}$.

Если коэффициенты A , B и C уравнения (10а) положительны и выражение $(AB - C) > 0$, то в этом случае положительные значения корней λ и s_1 невозможны и работа двигателя будет устойчивой.

Случай $\lambda > 0$ получается при положительных значениях коэффициентов A , B и C уравнения (10а) и отрицательном выражении $(AB - C)$, что возможно при $\epsilon_{\delta R} > \epsilon_a$.

Таким образом, неустойчивый режим работы двигателя при стабилизации скорости вращения его посредством центробежного вибрационного регулятора в цепи возбуждения может возникнуть при условии, когда в уравнении (10а) коэффициент $C < 0$ или при положительных значениях A , B и C выражение $(AB - C) \leq 0$. Отсюда условиями устойчивости режима работы двигателя при стабилизации скорости вращения его будут являться следующие соотношения:

$$A, B \text{ и } C > 0 \quad (14a)$$

и одновременно

$$(AB - C) > 0. \quad (146)$$

Основной причиной неустойчивого режима работы двигателя при стабилизации скорости вращения его может являться ослабление поля полюсов реакцией якоря. Наряду с этим дополнительными причинами этого явления могут быть:

- а) относительно большие маховые массы на валу двигателя,
- б) слабое насыщение магнитной системы его,
- в) относительно малая постоянная времени цепи возбуждения двигателя.

Что касается поведения пружины регулятора при стабилизации скорости вращения двигателя, то при устойчивой работе и установившемся режиме его, как показывает уравнение (13), она совершает два основных вида колебаний — низкочастотные автоколебания с угловой частотой ω_a и собственные колебания под влиянием упругости ее с угловой частотой γ . Кроме этого, пружина регулятора совершает также вынужденные колебания под влиянием собственного веса и груза с угловой частотой стабилизируемой скорости вращения двигателя ω_o . Однако амплитуда этих колебаний обычно значительно меньше амплитуды автоколебаний пружины и поэтому они не оказывают существенного влияния на поведение системы.

Выводы

Результаты теоретического исследования процессов стабилизации скорости вращения электродвигателей постоянного тока посредством центробежного вибрационного регулятора скорости в цепи возбуждения позволили выяснить поведение системы в отношении характера и частоты колебания скорости вращения якоря относительно стабилизируемого значения ее и вибраций пружины регулятора и установить также условия устойчивой работы двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Ермолин, Переходные процессы в машинах постоянного тока, Госэнергоиздат, 1951.
2. Н. П. Ермолин и В. А. Лифанов, Исследование процессов стабилизации скорости вращения маломощных электродвигателей постоянного тока с помощью центробежных вибрационных регуляторов, Отчет по ОНИР, ЛЭТИ, 1954.
3. Н. П. Ермолин и В. А. Лифанов, Определение частоты и амплитуды автоколебаний в системе электродвигатель-центробежный вибрационный регулятор, „Известия ЛЭТИ“, вып. XXXI, 1957.

Поступила в январе 1957 г.

Инж. М. Г. КУЗНЕЦОВ

К ВОПРОСУ ЛИНЕАРИЗАЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЩЕТОЧНОГО КОНТАКТА В ЭМУ

В журнале „Вестник электропромышленности“ № 8 за 1956 г. [1] показано, что размагничивание магнитопровода электромашиного усилителя (ЭМУ) переменным током в значительной мере улучшает характеристики холостого хода и внешние характеристики усилителя. Ширина петли характеристики холостого хода усилителя уменьшается в 5 раз. Изменяется вид внешних характеристик: уменьшается ширина петли в 5—6 раз, улучшается линейность характеристик.

Дальнейшее улучшение внешних характеристик ЭМУ возможно осуществить при вибрационной линеаризации сопротивления щеточного контакта в короткозамкнутой цепи.

Идея метода вибрационной линеаризации заключается в создании в нелинейном звене дополнительных вибраций при помощи внешнего периодического воздействия [2, 3]. Вольтамперная характеристика щеточного контакта при отсутствии вибраций имеет вид кривой *a* рис. 1, где $U_{щк}$ — напряжение щеточного контакта, j — плотность постоянного тока в короткозамкнутой цепи ЭМУ. На постоянный ток j наложим извне переменный ток, амплитуда которого A больше величины j_0 . Теперь напряжение щеточного контакта будет изменяться в течение периода по кривой *b* рис. 1. Аппроксимировав кривую *a* двумя прямыми линиями с коэффициентами наклона k_1 и k_2 , можем подсчитать величину напряжения щеточного контакта за период

$$(U_{щк})_{cp} = \frac{1}{2\pi} \left\{ 2 \int_0^{u_1} k_1 (j + A \sin u) du + \int_{u_1}^{\pi - u_1} \{k_1 j_0 + k_2 [A \sin u - (j_0 - j)]\} du - 2 \int_{\pi}^{\pi + u_2} k_1 [j - A \sin(\pi + u)] du - 2 \int_{\pi + u_2}^{\pi + u_3} k_1 [A \sin(\pi + u) - j] du - \int_{\pi + u_3}^{2\pi - u_3} \{k_1 j_0 + k_2 [A \sin(\pi + u) - (j_0 + j)]\} du \right\}.$$

Здесь $u_1 = \arcsin \frac{j_0 - j}{A} \simeq \frac{j_0}{A} - \frac{j}{A}$;

$$u_2 = \arcsin \frac{j}{4} \simeq \frac{j}{4};$$

$$u_3 = \arcsin \frac{j_0 + j_\infty}{A} = \frac{j_0}{A} + \frac{j}{A}.$$

Ограничиваясь первыми степенями разложения в ряд арксинуса, получим эти приближенные равенства. Вычислив интегралы, будем иметь

$$(U_{\mu\kappa})_{ep} = \frac{1}{2\pi} \left[2\pi k_2 j + 4(k_1 - k_2) \frac{j_0 j}{A} \right] = \left[k_2 + \frac{2}{\pi} (k_1 - k_2) \frac{j_0}{A} \right] j.$$

Итак, среднее за период значение напряжения щеточного контакта пропорционально постоянному току j в цепи нелинейного элемента (щеточного аппарата короткозамкнутой цепи ЭМУ). Дру-

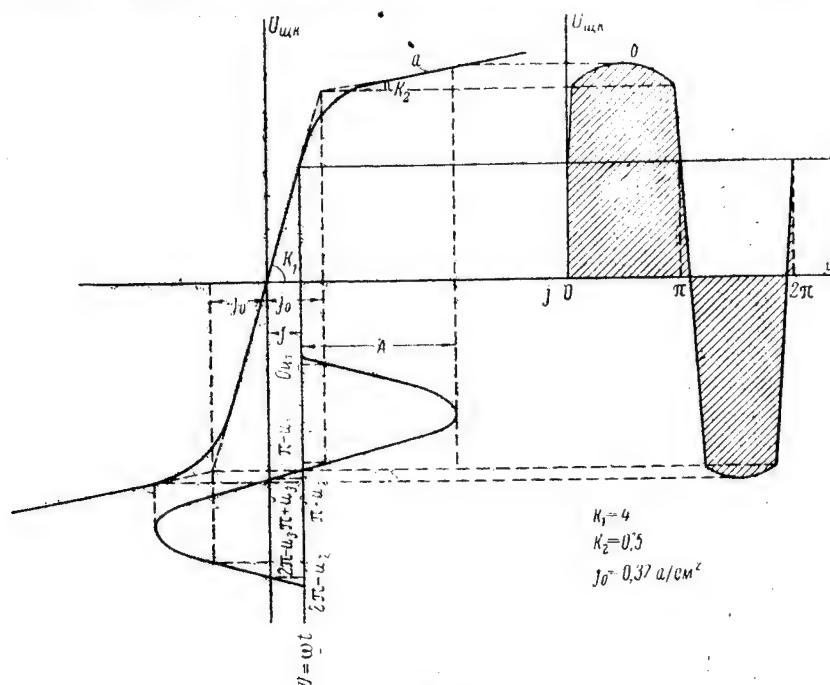


Рис. 1.

гими словами, при наложении переменного тока на постоянный ток, проходящий в цепи щеток, происходит усреднение величины сопротивления щеточного контакта. Это сопротивление становится практически независимым от величины постоянного тока, текущего через щетки. Практически к нулю сводится гистерезис щеточного контакта (рис. 2).

Для получения вибрационного контура можно использовать цепь с трансформатором. Возможны две схемы включения трансформатора в короткозамкнутую цепь усилителя (рис. 3).

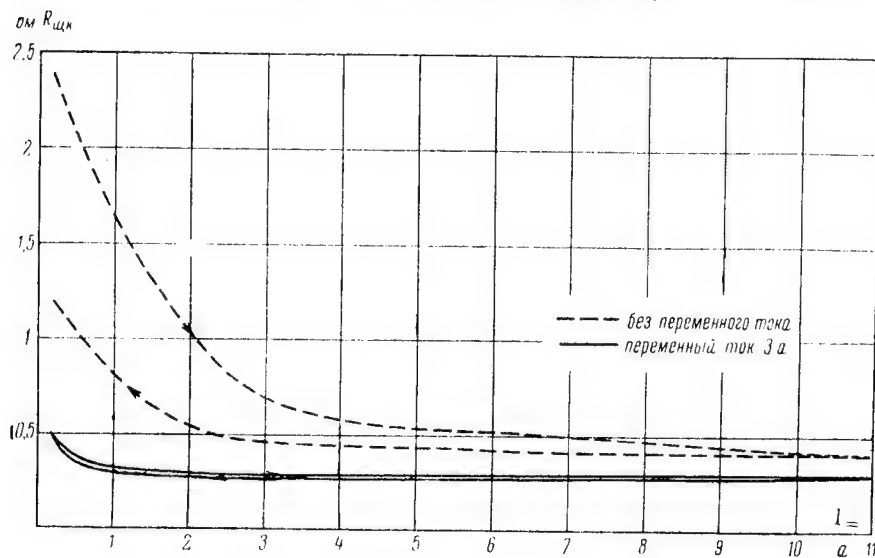


Рис. 2.

В схеме, выполненной по рис. 3а, вторичная обмотка трансформатора включается непосредственно в рассечку между короткозамкнутыми щетками. Переменный ток проходит через щетки и якорь

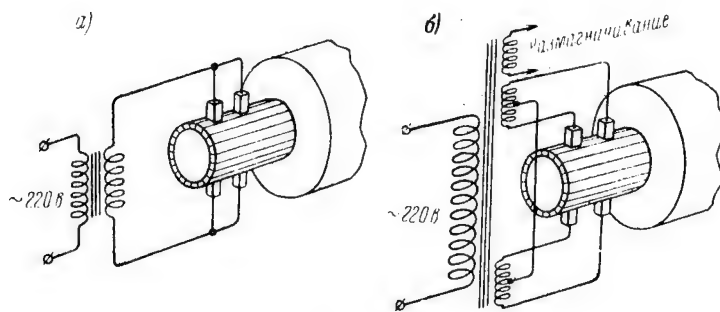


Рис. 3.

усилителя. При этом на выходе ЭМУ индуктируется переменная э. д. с. величиной 20 в, что не всегда желательно.

На рис. 4а приведены внешние характеристики для ЭМУ-25-3000. Характеристики получены при 50 в напряжения на усилителе и нормальной компенсации продольной реакции якоря в машине

при $U_{эм,н} = 50$ в. Характеристика *I* получена при включенном размагничивании (здесь и дальше м. д. с. размагничивания равняется 60 ампер-виткам) и при отсутствии переменного тока в короткозамкнутой цепи усилителя. Характеристика *II* — при включенном размагничивании и переменном токе промышленной частоты в короткозамкнутой цепи (рис. 3а). Как видно из рисунка, ширина петли внешней характеристики уменьшается в 2 раза. Одновременно внешняя характеристика ЭМУ спрямляется. Для сравнения на этом же рисунке приведена характеристика *III* — естественная внешняя характеристика ЭМУ (при отсутствии размагничивания магнитопровода и переменного тока в короткозамкнутой цепи).

Для того чтобы переменный ток не попадал в цепь якоря ЭМУ, была использована схема, показанная на рис. 3б. Здесь переменный

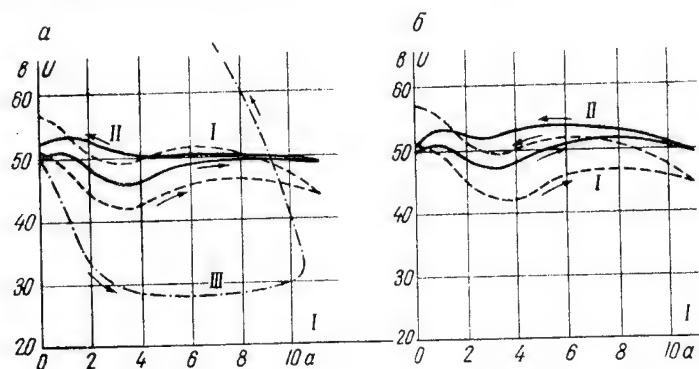


Рис. 4.

ток (2, 5÷3) *a* проходит через одну щетку, пластину коллектора и вторую щетку. Каждая пара щеток короткозамкнутой цепи усилителя подключается к отдельной вторичной обмотке трансформатора, имеющей среднюю точку. Средние точки вторичных обмоток замыкаются накоротко проводником, образуя короткозамкнутую цепь ЭМУ. Такая схема включения вторичных обмоток трансформатора исключает возможность подмагничивания трансформатора со стороны постоянного тока короткозамкнутой цепи усилителя.

Переменный ток 3 *a* (амплитуда 4,2 *a*) не перегружает щетки короткозамкнутой цепи. Номинальное значение постоянного тока в этой цепи 3 *a*. Размер щетки 20×5 мм; для постоянного тока щетки соединены параллельно. Таким образом, плотность постоянного тока под щеткой — 1,5 *a/cm*². С учетом переменного тока общая плотность тока под щеткой — 4,5 *a/cm*². Электрографитированные щетки, применяемые для ЭМУ-25, допускают нормально плотность тока 10 — 12 *a/cm*².

На рис. 4б приведены внешние характеристики для того же ЭМУ-25-3000, полученные при том же напряжении на усилителе и при той же компенсации. Характеристика *I* на рис. 4б та же,

что и на рис. 4а. Характеристика II получена при включенном размагничивании и переменном токе 3 а в цепи щеток (рис. 3б). Частота переменного тока $f=60$ гц. При частоте $f=50$ гц на постоянный ток, текущий в этой цепи, накладываются биения частотой 0,3 гц, с амплитудой, пропорциональной величине переменного тока в цепи щеток (при переменном токе 3 а амплитуда низкочастотных биений порядка 0,1—0,2 а). Именно поэтому для получения характеристики II на рис. 4б была взята частота $f=60$ гц. Как и в первом случае, ширина петли внешней характеристики сужается вдвое.

Опыт с линейризацией щеточного контакта был проделан также на машине ЭМУ-25-1500. Скорость вращения якоря для этого усилителя 1500 об/мин и условия работы щеток легче, чем при скорости

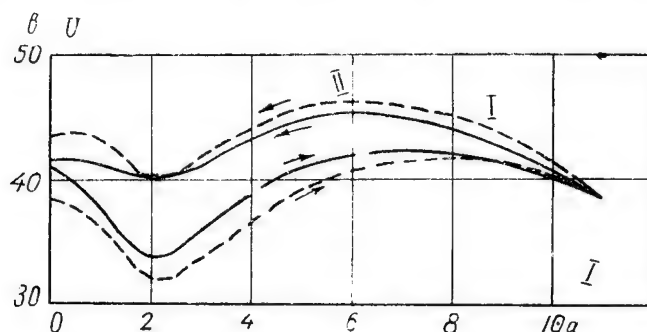


Рис. 5.

вращения якоря 3000 об/мин. Вибрационная линейризация в этом случае также сужает петлю внешней характеристики усилителя (рис. 5). Характеристики I и II аналогичны приведенным на рис. 4. Подача переменного тока в короткозамкнутую цепь, как и в схеме, приведенной на рис. 3б. Здесь тоже имеют место низкочастотные колебания в короткозамкнутой цепи и на выходе усилителя, и также желательна частота, некратная 50 гц.

Выводы

1. Вибрационная линейризация делает независимым сопротивление щеточного контакта от величины постоянного тока в цепи якоря машины.
2. Работа щеточного аппарата в большой мере зависит от скорости вращения якоря ЭМУ.
3. Применение вибрационной линейризации сопротивления щеточного контакта в короткозамкнутой цепи ЭМУ, наряду с размагничиванием магнитопровода, позволяет осуществить дальнейшее улучшение внешних характеристик усилителя.

4. Для целей размагничивания и линеаризации целесообразно использовать общий трансформатор.

5. Для линеаризации сопротивления щеточного контакта желательна частота, некратная 50 гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. „Вестник электропромышленности“, № 8, 1956.
2. „Автоматика и телемеханика“, № 6, 1947.
3. Е. П. Попов. Динамика систем автоматического регулирования, 1954.

Поступила в марте 1957 г.

Инж. Б. В. ШАМРАЙ

ОПТИМАЛЬНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ ТОРОИДАЛЬНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

Одним из наиболее сложных вопросов при проектировании магнитных усилителей является вопрос выбора геометрических соотношений сердечников с точки зрения получения максимального коэффициента усиления при минимальных габаритах и весе. В настоящее время эту задачу можно считать решенной для сердечников из Ш-образных пластин, по выбору которых имеются соответствующие рекомендации [1]. Для тороидальных сердечников таких рекомендаций нет, что вызывает значительные трудности для проектировщика.

Учитывая, что тороидальные сердечники являются основным типом сердечников для магнитных усилителей, важность рекомендаций по их выбору очевидна.

Сложность зависимостей геометрических размеров, обмоточного окна и коэффициента усиления от изменения одного из параметров, к сожалению, не позволяет провести количественный анализ и приходится ограничиваться качественным. Однако и качественный анализ дает возможность прийти к определенным выводам об оптимальных геометрических соотношениях и получить простое инженерное решение.

При проведении анализа наиболее целесообразно исходить из известного уравнения мощности на входе усилителя

$$P_y = \rho \frac{H_y^2}{k_{зм}} l_0^2 \frac{l_y}{Q_y} 10^{-4}, \quad [1]$$

где:

ρ — удельное сопротивление меди;

$k_{зм}$ — коэффициент заполнения меди;

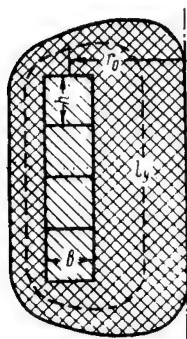
H_y — напряженность поля управления, $\frac{ав}{см}$;

l_0 — средняя длина магнитной силовой линии для потока управления, см;

l_y — средняя длина витка обмотки управления, см;

Q_y — площадь обмоточного окна, $с\ м^2$.

Положив d_0 и $V_{em} = \text{const}$ (понимая под V_{em} объем одного тороида для дроссельного усилителя и объем одного плеча для двухтактного), рассмотрим, как будет влиять изменение отношения $\frac{h}{b}$ на абсолютную величину значения



$$c_1 = \left| \frac{I_y}{Q_y} \right|.$$

Пренебрегая пока площадью окна, занимаемой всеми остальными обмотками, по сравнению с площадью, занимаемой обмоткой управления (рис. 1), и задаваясь различными объемами стали, проведем ряд подсчетов для двухтактного усилителя.

Вначале объем и d_0 принимаем постоянным, изменяя величину отношения $\frac{h}{b}$ и соответственно $\frac{d_0}{b}$, а затем изменяем объем, оставляя постоянными $\frac{h}{b}$ и $\frac{d_0}{b}$.

Рис. 1.

Результаты подсчетов сведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, значение c_1 при неизменной величине среднего диаметра d_0 с увеличением отношения $\frac{h}{b}$ от 0,125 до 0,25 резко падает, в районе $\frac{h}{b} = 0,5 \div 4$ остается почти постоянным и минимальным и при $\frac{h}{b} > 4$ начинает медленно возрастать.

Таблица 1

$\frac{h}{b}$	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
V_{em}									
3,92	26	3,3	2,4	2,25	2,25	2,25	2,25	2,3	3,0
31,4	12,9	1,6	1,21	1,12	1,12	1,12	1,12	1,15	1,5
100	8,2	1,02	0,82	0,76	0,76	0,76	0,76	0,78	0,9
252	6,4	0,71	0,61	0,56	0,56	0,56	0,56	0,58	0,66

При изменении объема характер зависимости $c_1 = f\left(\frac{h}{b}\right)$ остается неизменным, а само значение c_1 меняется обратно пропорционально корню третьей степени из относительного изменения объема. Следовательно, для любой величины объема абсолютное значение c_1 может быть определено по формуле:

$$c_{1v} = c_{1100} \sqrt[3]{\frac{100}{V_{em}}}. \quad (2)$$

Определяя значение c_1 для данного объема, мы связывали ($d_0 = \text{const}$) между собой изменение отношений $\frac{d_0}{b}$ и $\frac{h}{b}$.

Дадим теперь возможность независимого изменения $\frac{d_0}{b}$ и $\frac{h}{b}$ и выясним влияние их на величину коэффициентов:

$$c_2 = \left| \frac{d_0^2 l_y}{Q_y} \right| = c_1 d_0^2$$

и

$$c_3 = |Q l_y| = c_1 Q_y^2.$$

Очевидно, что коэффициентом c_3 определяется объем меди усилителя (V_m), дробью $\frac{1}{c_2}$ — коэффициент усиления, произведением $c_2 c_3$ — объем меди на единицу коэффициента усиления и произведением $c_2 (c_3 + 2V_{cm})$ — полный объем на единицу коэффициента усиления.

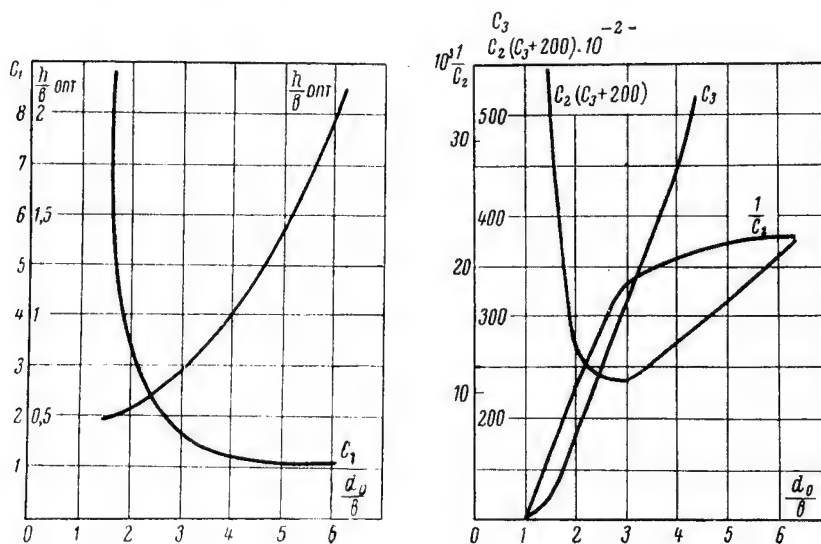


Рис. 2.

Задав произвольно объемом $V_{cm} = 100 \text{ см}^3$, проведем подсчеты, сведя результаты в табл. 2, по данным которой построим зависимости рис. 2.

Таким образом, оказывается (см. табл. 2 и рис. 2), что для каждого значения $\frac{d_0}{b}$ существует свое оптимальное отношение $\frac{h}{b}$, при котором объем меди или полный объем на единицу коэффициента усиления имеют минимальное значение. При этом необходимо отметить, что

Таблица 2

$\frac{d_0}{b}$	1,5						2,0					
$\frac{h}{b}$	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2,0	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2,0
$d_0, \text{ см}$	5,2	4,15	3,62	3,3	2,88	2,62	6,3	5,0	4,4	4,0	3,5	3,17
$Q, \text{ см}^2$	2,38	1,5	1,14	0,95	0,72	0,6	7,86	5,0	3,84	3,16	2,44	2,0
c_1	7,8	13	19	25,5	39,8	55,6	2,08	3,54	5,22	7,0	11	15,3
c_2	211	222	250	276	330	380	83	89	100	112	135	154
c_3	42,2	29,2	24,6	23	20,6	20	129	88,5	77	70	65,5	61
$10^3 \frac{1}{c_2}$	4,75	4,5	4,0	3,72	3,03	2,63	12	11,25	10	8,95	7,4	6,5
$10^{-2} c_2 \cdot c_3$	89	64,3	61,4	63,5	68	76	107	78	77	77	88,5	94
$10^{-2} c_2 \cdot (c_3 + 200)$	512	508	560	624	730	836	274	256	277	315	358	400

Продолжение табл. 2

$\frac{d_0}{b}$	3						4					
$\frac{h}{b}$	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5
$d_0, \text{ см}$	6,6	5,76	5,22	4,56	4,15	3,86	8,0	6,98	6,34	5,54	5,02	4,65
$Q, \text{ см}^2$	15,2	11,6	9,5	7,26	6,0	5,2	28,4	21,6	17,9	13,7	11,4	9,6
c_1	1,16	1,65	2,13	3,35	4,6	5,9	0,682	0,94	1,22	1,8	2,42	3,1
c_2	50,5	55	59,5	70	79	88	43,5	45,6	49	55,4	61	67
c_3	270	220	197	177	166	160	550	440	390	338	314	235
$10^3 \frac{1}{c_2}$	19,8	18,2	16,8	14,3	12,7	11,4	23	22	20,4	18	16,4	14,9
$10^{-2} c_2 \cdot c_3$	136	120	117	121	131	141	210	200	191	130	191	192
$10^{-2} c_2 \cdot (c_3 + 200)$	235	230	235	261	290	320	322	292	290	300	315	325

Продолжение табл. 2

$\frac{d_0}{b}$	5						6					
$\frac{h}{b}$	0,5	0,75	1	1,5	2,0	2,5	0,5	0,75	1	1,5	2,0	2,5
$d_0, \text{ см}$	9,3	8,1	7,36	6,44	5,82	5,42	10,5	9,12	8,3	7,25	6,6	6,12
$Q, \text{ см}^2$	13,5	33	27,3	21	17,1	14,8	60	45,5	37,5	28,8	23,8	20,4
c_1	0,43	0,59	0,76	1,12	1,5	1,9	0,32	0,435	0,55	0,8	1,02	1,35
c_2	37,2	38,6	41	46,5	51	56	35,5	36,2	38	42	45	50,1
c_3	810	640	565	495	420	415	1150	900	775	662	580	560
$10^3 \frac{1}{c_2}$	26,9	25,9	24,3	21,5	19,6	17,9	28	27,8	26,3	23,8	22,2	20
$10^{-2} c_2 \cdot c_3$	300	247	231	230	214	232	410	326	295	278	261	280
$10^{-2} c_2 \cdot (c_3 \cdot 200)$	335	325	315	325	330	345	470	392	370	360	350	380

изменение $\frac{h}{b}$ в пределах $\pm 30\%$ от оптимальной величины влияет весьма незначительно, благодаря тому, что минимум очень полог.

По мере увеличения отношения $\frac{d_0}{b}$ одновременно увеличивается коэффициент усиления и объем меди, причем объем меди увеличивается значительно быстрее, так как отношение $\frac{V_{\text{м}}}{k_p}$ все время возрастает.

Рост полного объема усилителя по мере увеличения $\frac{d_0}{b}$ вначале отстает от роста коэффициента усиления, так что величина $\frac{V_{\text{м}} + 2V_{\text{см}}}{k_p}$ падает, а затем обгоняет рост коэффициента усиления и $\frac{V_{\text{м}} + 2V_{\text{см}}}{k_p}$ возрастает.

Минимальное значение полного объема на единицу коэффициента усиления получается при $\frac{d_0}{b} = 3$ и $\frac{h}{b} = 0,75$.

Так как при изменении объема будут меняться только числовые значения величин, а характер приведенных зависимостей останется тем же самым, очевидно, за оптимальные геометрические соотношения тороидальных сердечников для двухтактных усилителей следует

принять $\frac{d_0}{b} = 3$ и $\frac{h}{b} = 0,75$. Для дроссельных магнитных усилителей оптимальными геометрическими соотношениями будут $\frac{d_0}{b} = 3$ и $\frac{h}{b} = 1,5$.

Подставив полученные оптимальные значения соотношений в выражение для объема, будем иметь:

$$V_{cm} = 0,0167 l_0^3,$$

откуда весьма просто определить оптимальные геометрические размеры сердечника

$$l_0 = 3,9 \sqrt[3]{V_{cm}}. \quad (3)$$

Полученное значение l_0 для учета площади окна, занимаемой остальными обмотками и технологическим отверстием, должно быть увеличено для малых сердечников ($l_0 \leq 10$ см) на 15%, для остальных — на 10%.

Имея значение $l_{0\text{ опт}}$, легко определяем и остальные размеры сердечника:

$$d_0 = \frac{l_0}{\pi}.$$

Для двухтактных усилителей	Для дроссельных усилителей
$S_{cm} = \frac{V_{cm}}{2l_0}$	$S_{cm} = \frac{V_{cm}}{l_0}$

Для сердечников, набираемых из колец

$b = 1,15 \sqrt{S_{cm}}$	$b = 0,815 \sqrt{S_{cm}}$
$h = \frac{S_{cm}}{bk_{\text{зс}}}$	$h = \frac{S_{cm}}{bk_{\text{зс}}}$

Для сердечников, навиваемых из ленты

$h = 0,865 \sqrt{S_{cm}}$	$h = 1,22 \sqrt{S_{cm}}$
$b = \frac{S_{cm}}{hk_{\text{зс}}}$	$b = \frac{S_{cm}}{hk_{\text{зс}}}$

Наличие оптимальных геометрических соотношений позволяет весьма просто получить требуемую при расчете на минимальные габариты и вес зависимость

$$k_p = f(H_{\mu}).$$

Действительно, подставив в выражение (1) выражения (2) и (3), получим формулу

$$P_y = 2,05 \cdot 10^{-4} \frac{H_y^2}{k_{эм}} \sqrt[3]{V_{см}},$$

которая при наличии зависимости

$$\frac{V_{см}}{P_{max}} = f(H_y),$$

легко позволяет построить требуемую кривую $k_p = f(H_y)$.

ЛИТЕРАТУРА

Н. П. Васильева и О. А. Седых, Расчет дроссельных магнитных усилителей с комплексной нагрузкой, „Автоматика и телемеханика“, т. XVI, № 1, 1955.

Поступила в мае 1956 г.

Инж. Н. И. ОСИПОВ

ВЛИЯНИЕ ЕМКОСТНОЙ СВЯЗИ НА РАБОТУ ИНДУКЦИОННОГО ДАТЧИКА ПРИ ПОВЫШЕННОЙ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЕ

Введение

В автоматизации производственных процессов в лабораторных условиях, и особенно в области изучения явлений, связанных с перемещением механизмов, широко применяются электрические измерения неэлектрических величин.

Рекомендуемый для этой цели индукционный датчик не может быть применен для быстропотекающих явлений из-за появления нулевого разбаланса при повышенной несущей частоте.

В настоящей статье приводятся результаты теоретического и экспериментального исследования индукционного датчика с широким диапазоном перемещения рабочего элемента.

В результате проведенной работы выяснились причины нулевого разбаланса и намечались пути к его ограничению, что позволит улучшить работу датчика и значительно расширить область его применения для изучения быстропотекающих явлений и создания эффективных микродатчиков.

Предложенный анализ емкостных токов и их влияние на создание добавочных э. д. с. в обмотках найдет применение при решении многих задач в технике звуковых и повышенных частот.

Принцип работы датчика

Датчик представляет из себя дифференциальный трансформатор с сильно разомкнутой магнитной цепью. На рис. 1 дана схема датчика с трансформаторным выходом.

Первичная и вторичная обмотки состоят каждая из двух секций; первичные секции соединены параллельно согласно, а вторичные последовательно встречно. Обмотки наложены на изоляционный или

люралевого тонкостенного каркаса (около 0,1 мм), внутри катушки находится цилиндрический якорек из мягкого железа или феррита. При строго симметричном расположении якорька, в центре катушки в аксиальном направлении, результирующее напряжение на вторичной обмотке должно быть равно нулю, а при смещении его вправо или влево, вторичная э. д. с. E_2 будет равна разности э. д. с. двух секций, включенных встречно.

На рис. 2 дана зависимость величины ΔU_2 от перемещения якоря от среднего положения.

Для изучения быстро протекающих процессов, а также в целях повышения чувствительности датчиков, приходится повышать частоту питающего напряжения, что в свою очередь сопровождается поднятием характеристики датчика над осью абсцисс (рис. 3). Это обстоятельство затрудняет использование датчика из-за наличия постоянной составляющей э. д. с. или тока на выходе.

При знакопеременном перемещении якоря нужно выбрать его начальное положение (нулевое) на правой или левой ветви кривой

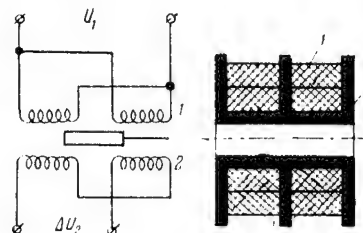


Рис. 1.

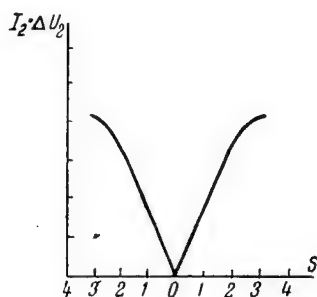


Рис. 2.

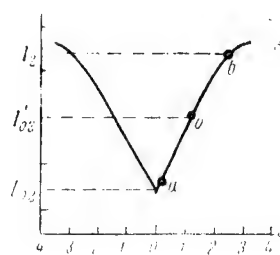


Рис. 3.

и скомпенсировать начальный выходной выпрямленный ток посторонним источником тока. Рабочий диапазон будет находиться на прямолинейном участке от a до b .

При повышении частоты постоянная составляющая паразитного тока I_{02} или э. д. с. могут достигать значительных величин, превышающих весь полезный сигнал, и сильно усложняют схему добавочным компенсационным устройством.

При анализе работы датчика нами установлено, что появление нулевого разбаланса (паразитный ток или э. д. с.) обязано добавочным магнитным полям, возбуждаемым емкостными токами, протекающими по обмоткам.

Анализ емкостных токов, имеющих место в датчике

Катушка датчика с однослойными первичной и вторичной обмотками

1 - й вариант.

Первичная и вторичная обмотки намотаны в одном направлении в обеих секциях, а секции между собой намотаны в разных направлениях (рис. 4).

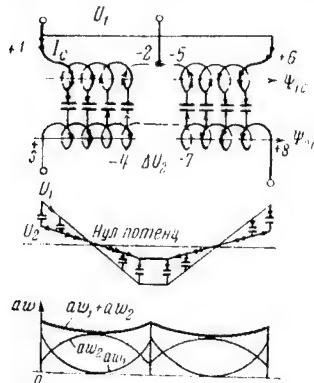


Рис. 4.

Для удобства расчетов и составления эквивалентных схем заменим распределенные емкости сосредоточенными параметрами. Это можно

Средние точки обмоток 2-5 и 4-7 соединим между собой и будем рассматривать одну секцию как трансформатор, соединенный смежными концами обмоток.

Каркас катушки считаем изготовленным из изолирующего материала, якорь железный на изолирующем стержне связан с подвижной частью (рис. 5).

При таком устройстве катушки и обмоток можем пренебрегать емкостями на корпус (землю), емкостями между секциями, а также и межвитковой емкостью в каждой из обмоток.

Рассмотрению подлежит только распределенная емкость между обмотками.

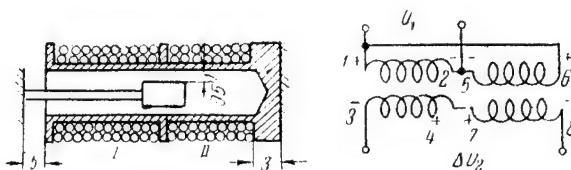


Рис. 5.

сделать на том основании, что если к обмотке трансформатора приложить напряжение U , то полная энергия, запасенная в электростатическом поле, будет:

$$W = \frac{1}{2} C_D U^2,$$

где C_D представляет собой действующую емкость.

Введение понятия действующей или эффективной емкости упрощает расчеты емкостных токов в обмотках, оперируя только с номинальным напряжением на обмотках, и допускает замену распределенных емкостей сосредоточенными.

Рассматривая каждую секцию датчика отдельно как трансформатор, будем считать емкость между обмотками равной емкости плоского конденсатора, имеющего площадь $Sl \text{ см}^2$, где S — периметр между обмотками в сантиметрах и l — длина обмоток в сантиметрах (краевым эффектом можно пренебречь из-за малого расстояния между обмотками, равного $0,002 \text{ см}$).

Емкость плоского конденсатора подсчитывается по формуле:

$$C_0 = 0,0885 \frac{\epsilon \cdot A \cdot 10^{-12}}{\Delta} [\phi]. \quad (1)$$

Энергия, запасенная в конденсаторе:

$$W = \frac{1}{2} C_0 U^2 [\text{дж}].$$

При расчете действующей распределенной емкости между обмотками трансформатора, в отличие от емкости плоского конденсатора, имеющего эквипотенциальные поверхности, нужно учитывать распределение напряжения в обмотках.

Распределение напряжения вдоль однослойной обмотки датчика, при отсутствии якоря, считаем линейным, что очень близко к действительности.

Поскольку нас интересует причина появления разбаланса, имеющего место как при наличии якоря в среднем положении, так и при его отсутствии, то в дальнейшем будем рассматривать катушку датчика с вынутым якорем.

На рис. 6 показаны первичная и вторичная обмотки, имеющие произвольные напряжения. Требуется рассчитать эффективную емкость между обмотками.

Приведем окончательный результат для выражения электростатической энергии, запасенной между обмотками трансформатора [1]:

$$W = \frac{0,0885 \cdot \epsilon \cdot S}{2\Delta} \cdot \frac{l}{3} [(\delta U_a)^2 + \delta U_a \cdot \delta U_b + (\delta U_b)^2] \cdot 10^{-12} [\text{дж}]$$

или

$$W = \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 [(\delta U_a)^2 + \delta U_a \cdot \delta U_b + (\delta U_b)^2] \cdot 10^{-12} [\text{дж}]. \quad (2)$$

Тогда емкость, приведенную к первичной или вторичной обмотке, можно подсчитать:

$$C_D = \frac{2W}{U^2} \cdot 10^{-12} [\phi]. \quad (3)$$

Из рис. 6 видим, что δU_a и δU_b — разности потенциалов между первичной и вторичной обмотками на концах обмоток.

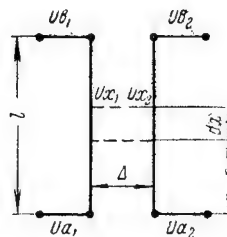


Рис. 6.

Распространим подсчет действующей емкости между обмотками индукционного датчика в зависимости от способов намотки катушек,

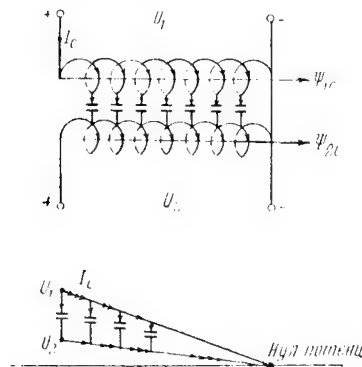


Рис. 7.

направления витков, коэффициента трансформации, направления емкостных токов и их воздействия на работу датчика. Выясним для нашего случая, по первому варианту намотки катушек датчика, чему будет равна эффективная емкость, при соединенных средних концах обмоток, в зависимости от коэффициента трансформации.

На рис. 7 показана схема и диаграмма распределения потенциалов между обмотками и направление емкостных токов одной секции.

В отличие от трансформатора с замкнутой стальной магнитной цепью, мы должны учитывать, при количественной оценке действующей емкости, фазные сдвиги между первичным и вторичным напряжениями, которые отличны от 180° или от 0° (см. векторную диаграмму на рис. 8).

$$W = \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 [\delta U_a^2 + \delta U_a \cdot \delta U_b + (\delta U_b)^2] \cdot 10^{-12} [\text{дж}];$$

в нашем случае

$$\begin{aligned} \delta U_a^2 &= 0; \quad \delta U_a \cdot \delta U_b = 0; \quad (\delta U_b)^2 = (U_2 - U_1)^2; \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 (U_2 - U_1)^2 \cdot 10^{-12} [\text{дж}] \end{aligned}$$

или

$$W = \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 (n U_1 - U_1)^2 = \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 U_1^2 (n - 1)^2 \cdot 10^{-12} [\text{дж}];$$

тогда

$$C_D = \frac{2W}{U_1^2} \cdot 10^{-12} = \frac{2 \cdot C_0 U_1^2 (n - 1)^2}{2 \cdot 3 \cdot U_1^2} \cdot 10^{-12} = \frac{C_0}{3} (n - 1)^2 \cdot 10^{-12} [\text{ф}].$$

Таким образом, приведенная к первичной обмотке действующая емкость между обмотками, намотанными в одном направлении, в зависимости от коэффициента трансформации будет:

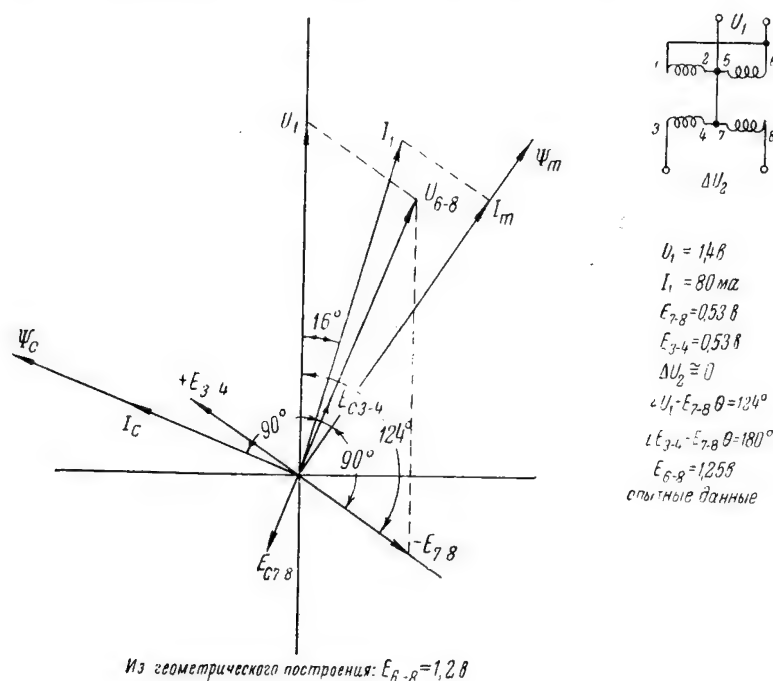
$$C_D = \frac{C_0}{3} (n - 1)^2, \quad (4)$$

где C_0 — полная емкость между обмотками, считая их эквипотенциальными поверхностями.

При $n = 1$ $C_D = 0$, что ясно из потенциальной диаграммы, когда $U_2 - U_1 = 0$ и $I_c = 0$. В действительности же в датчике с большим

линейным перемещением якоря невозможно добиться нулевого значения емкостных токов даже при коэффициенте трансформации, равном единице, благодаря тому, что вектор приложенного напряжения и вектор вторичной э. д. с. расходятся по фазе на угол, отличный от 0° (условимся называть отношение вторичной э. д. с. к первичному напряжению коэффициентом трансформации $n = \frac{E_2}{U_1}$).

Возбуждаемые емкостными токами магнитные потоки действуют в одном направлении в первичной и вторичной обмотках (см. рис. 7).



Магнитодвижущая сила от емкостных токов распределяется неравномерно по длине катушки (см. рис. 4, 9, 10, 11), на которых даны кривые ампер-витков на единицу длины). Благодаря этому, при неидентичном выполнении намотки, абсолютные значения магнитодвижущих сил в секциях будут различными, а следовательно, различными будут и возбуждаемые ими во вторичных обмотках э. д. с., в результате чего появится разбаланс ΔU_2 .

Если намотку вторичной обмотки произвести в обратном направлении и смежные концы оставить также соединенными вместе, то потенциальная диаграмма и направление емкостных токов будут иметь вид, как указано на рис. 12. Для этого случая нетрудно

убедиться из предыдущего вывода формулы энергии электростатического поля, что действующая емкость примет вид:

$$C_D = \frac{C_0}{3}(n+1)^2; \quad (5)$$

при $n=1$ $C_D = \frac{4}{3}C_0$. При встречной намотке первичной и вторичной обмоток магнитные потоки от емкостных токов имеют взаимно противоположные направления (см. рис. 12) и существуют при любом коэффициенте трансформации. Благодаря неравномерному распределению магнитодвижущей силы по длине катушки (см. рис. 10), полной взаимной компенсации магнитных потоков не будет.

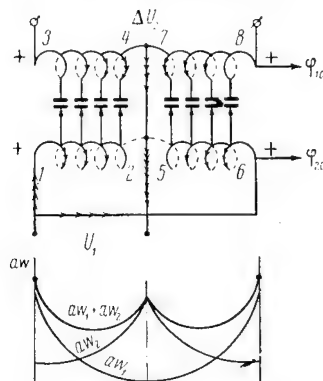


Рис. 9.

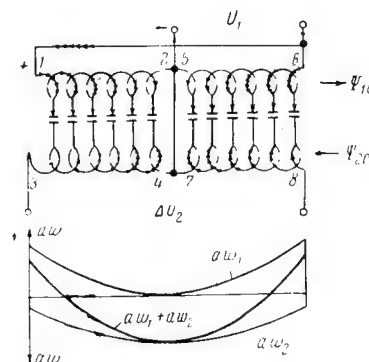


Рис. 10.

Разность наводимых во вторичных обмотках э. д. с. будет зависеть также от степени идентичности намотки в секциях и от степени расхождения по фазе вектора вторичной э. д. с. от приложенного к первичной обмотке напряжения.

В катушках датчиков, намотанных на металлические каркасы, следует учитывать распределенные емкости на корпус (рис. 13). В этом случае эффективная емкость будет иметь следующий вид:

$$C_D = \frac{C_0}{3}, \quad (6)$$

т. е. не зависит от коэффициента трансформации. Это следует из выражения для энергии электростатического поля

$$W = \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 (U_2 \pm U_1)^2;$$

при $U_2 = 0$

$$W = \frac{C_0}{2 \cdot 3} U_1^2;$$

$$C_D = \frac{2W}{U_1^2} = \frac{2 \cdot U_1^2}{U_1^2 \cdot 2 \cdot 3} \cdot C_0 = \frac{C_0}{3}.$$

Влияние магнитных потоков, возбуждаемых емкостными токами, протекающими по обмотке и с обмотки на каркас датчика, нетрудно учесть, нанеся направление токов в обмотке совместно с токами

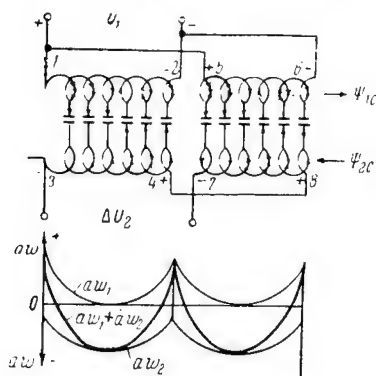


Рис. 11.

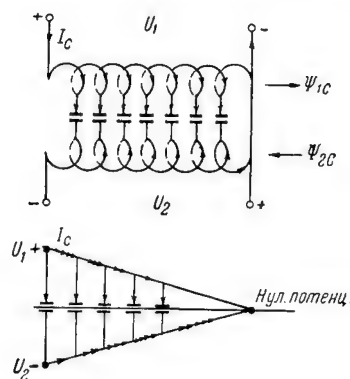


Рис. 12.

от межобмоточной емкости. При этом в построении векторной диаграммы для определения наводимых э. д. с. нужно учесть фазный сдвиг между этими двумя видами тока.

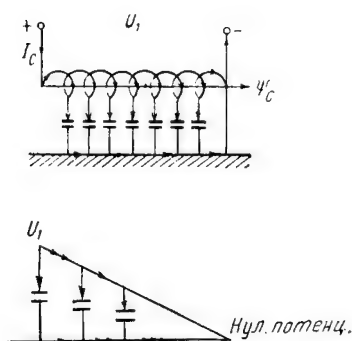


Рис. 13.

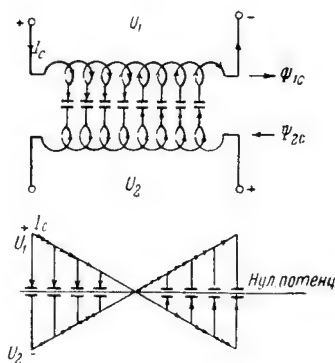


Рис. 14.

Положение вектора тока, протекающего через межобмоточную емкость, определяется вектором напряжения между обмотками, а вектор тока, протекающего через емкость на корпус датчика, определяется вектором напряжения на обмотке, прилегающей к корпусу.

2-й вариант.

Катушка датчика выполнена со встречной намоткой первичной и вторичной обмоток, средние точки между собой не соединены.

11*

На рис. 14 дана одна секция датчика и потенциальная диаграмма направлением емкостных токов.

Подставляя в выражение энергии электростатического поля соответствующие значения напряжений, с учетом потенциальных знаков, получим:

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 \{ [U_1 - (-nU_1)]^2 + [U_1 - (-nU_1)] [-U_1 - (nU_1)] + \\ &+ [-U_1 - (nU_1)]^2 \} = \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 [(nU_1 + U_1)^2 + (nU_1 + U_1)(-nU_1 - U_1) + \\ &+ (-nU_1 - U_1)^2] = \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 [U_1^2(n+1)^2 - U_1^2(n+1)^2 + U_1^2(n+1)^2] = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 U_1^2 (n+1)^2. \end{aligned}$$

Подставляя найденное значение W в выражение действующей емкости, приведенной к первичной обмотке, имеем:

$$C_D = \frac{2W}{U_1^2} = \frac{2 \cdot U_1^2}{2 \cdot 3 \cdot U_1^2} C_0 (n+1)^2 = \frac{C_0}{3} (n+1)^2;$$

при $n=1$ $C_D = \frac{4}{3} C_0$, т. е. имеет такое же значение, как и в случае обмотки, изображенной на рис. 12 с соединением смежных концов.

Из диаграммы очевидно, что если соединить средние точки первичной и вторичной обмоток между собой накоротко, то распределение емкостных токов не нарушится, что не трудно доказать из вывода выражения энергии электростатического поля. Разность напряжений между обмотками в любом месте по длине обмоток будет

$$\partial U_x = \partial U_a + (\partial U_b - \partial U_a) \frac{x}{l}.$$

В середине обмоток при $x=0,5l$, при $n=1$ и намотке первичной и вторичной обмоток в разных направлениях будем иметь:

$$\begin{aligned} U_1 = U_2 = U; \quad \partial U_a = U_2 - (-U_1) = 2U, \\ \partial U_b = -U_2 - U_1 = -2U; \end{aligned}$$

тогда

$$\partial U_{x=0,5l} = 2U + (-2U - 2U) \cdot 0,5 = 0,$$

т. е. разность потенциалов в середине обмоток равна нулю. Аналогично этому можно показать, что при $x=l$ $\partial U = 2U$.

Полная диаграмма магнитодвижущих сил в обмотках обеих секций датчика для рассматриваемой намотки представлена на рис. 11.

Магнитные потоки, вызванные емкостными токами, имеют разные направления в первичной и вторичной обмотках (см. рис. 11 и 14).

3 - й вариант.

Первичная и вторичная обмотки намотаны в одном направлении с несвязанными между собой концами (см. рис. 4 и 15).

Подставляя в выражение энергии электростатического поля соответствующие значения напряжений, аналогично предыдущему выводу, получим:

$$W = \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 [(nU_1 - U_1)^2 - U_1(n-1)U_1(n-1) + \{-U_1(n-1)\}^2] = \\ = \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 [U_1^2(n-1)^2 - U_1^2(n-1)^2 + U_1^2(n-1)^2] = \frac{1}{2 \cdot 3} C_0 U_1^2(n-1)^2.$$

Подставляя в выражение действующей емкости, имеем:

$$C_D = \frac{2W}{U_1^2} = \frac{2 \cdot U_1^2}{2 \cdot 3 \cdot U_1^2} C_0 (n-1)^2 = \frac{C_0}{3} (n-1)^2.$$

При $n=1$, $C_D=0$, т. е. имеем то же значение, что и для обмотки на рис. 7 с соединенными средними точками между секциями.

4 - й вариант.

Первичная и вторичная обмотки намотаны в одном направлении, одновременно, в два параллельных провода одинакового сечения и с одинаковым числом витков. Секции между собой могут быть намотаны согласно или встречно. При таком способе намотки межобмоточная емкость будет больше, чем при раздельной намотке первичной и вторичной обмоток. Межобмоточную емкость следует подсчитывать по формуле межвитковой емкости или емкости между двумя бесконечно длинными проводниками

$$C_0 = 0,12\epsilon \frac{2A}{\Delta} [\text{мкф}],$$

где

- ϵ — диэлектрическая проницаемость,
- $2A$ — площадь соприкасающихся с двух сторон витков в сантиметрах,
- Δ — расстояние между медью проводников в сантиметрах.

Действующую емкость следует подсчитывать, как и в предыдущих случаях, исходя из распределения потенциалов между обмотками.

Одновременная намотка первичной и вторичной обмоток в два параллельных провода повышает коэффициент трансформации и дает более идентичную намотку в обеих секциях в отношении распределенной емкости. Последнее обстоятельство имеет очень существенное влияние на величину разбаланса датчика при нейтральном положении якоря.

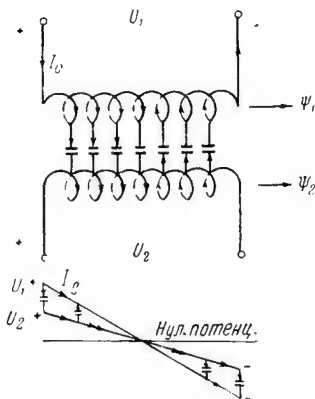


Рис. 15.

Нетрудно убедиться, что емкостные токи в обмотках будут иметь такие же направления, как и в рассмотренных ранее вариантах намотки катушек.

5 - й вариант (экранирование обмоток).

Пользуясь приводимым нами методом нанесения направления емкостных токов между обмотками и экраном, можем убедиться, что магнитные потоки, создаваемые емкостными токами первичной и вторичной обмоток, направлены встречно друг к другу (при условии, что U_1 и E_2 совпадают по фазе или расходятся на 180°) независимо от направления намотки первичной и вторичной обмоток. Действующая емкость, приведенная к первичной обмотке, в этом случае не будет зависеть от коэффициента трансформации и равна $C_D = \frac{1}{3} C_0$, поэтому воздействие магнитных потоков на создание добавочных э. д. с. ограничено.

Основное влияние в создании добавочных э. д. с. на выходе датчика будет оказывать угол расхождения по фазе U_1 от E_2 и неидентичности намотки катушек в секциях.

Применение экранов ухудшит магнитную связь между обмотками и затруднит идентичность выполнения намотки, так как каждая лишняя прослойка между обмотками вносит неопределенность укладки проводников по отношению нижележащего слоя, нарушая расстояние между ними.

Предварительные эксперименты, с экранированными обмотками, не дали хороших результатов.

Приводимая в [1] формула для подсчета действующей емкости, приведенной к первичной обмотке (в частном случае однослойных обмоток, соединенных между собой смежными концами), внешне сходна с выведенной нами формулой (4)

$$C_D = C_2^1 = \frac{(n-1)^2}{3} C_0.$$

Определение C_0 истолковано авторами [1] ошибочно, так как она принята ими за емкость между первичной и вторичной однослойными обмотками, соединенными между собой смежными концами; в действительности же это полная емкость между несоединенными обмотками с эквипотенциальными поверхностями. Однако действующая емкость между двумя однослойными обмотками, соединенными между собой смежными концами, есть величина постоянная и равна

$$C_D = \frac{C_0}{3}.$$

Общие соображения о работе датчика

Результирующая э. д. с. на выходе датчика при нейтральном положении якоря или при его отсутствии является разностью вторичных э. д. с.

Основной намагничивающий поток создается равномерно распределенной по длине катушки датчика магнитодвижущей силой, что обеспечивает равные и противоположно направленные э. д. с. на вторичных обмотках датчика.

Магнитодвижущая сила, вызванная емкостными токами, протекающими по первичной и вторичной однослойным обмоткам, распределяется неравномерно по длине катушки, и обе секции в магнитном отношении имеют слабую связь между собой.

На рис. 4, 9, 10, 11 представлены примерные кривые распределения магнитодвижущих сил в секциях катушек при симметричных емкостных токах в секциях. В действительности невозможно сделать вполне идентичную намотку секций датчика без нарушения симметрии магнитодвижущих сил, возникших от емкостных токов.

Неидентичность намотки вызывается главным образом неравномерностью натяга проводника при укладке, а следовательно, изменением расстояния между слоями обмоток. Особенно сильно сказывается наличие между слоями изоляционной прокладки. В результате этого на выходе появляется нескомпенсированная э. д. с. (нулевой разбаланс ΔU_2).

В однослойных катушках, в особенности намотанных в два параллельных провода (одновременно первичной и вторичной обмоток), можно добиться хорошей идентичности намотки и, следовательно, небольших нулевых разбалансов, при несущей частоте до 20 000 гц и выше.

Железо якоря датчика не должно быть насыщено магнитным потоком ($B \cong 200$ гс) и все индуктируемые э. д. с. и токи будут иметь синусоидальную форму. Поэтому для исследования работы датчика можем строить векторные диаграммы.

На рис. 8 представлена векторная диаграмма датчика с однослойной намоткой в два параллельных провода при $f = 20\,000$ гц, $L = 30$ мм; $\omega_1 = \omega_2 = 134$; $\varnothing 0,04$ мм (без якоря).

Благодаря однослойной намотке в два параллельных провода ток разбаланса, даже при несущей частоте $f = 20\,000$ гц, близок к нулю ($\sim 1,5$ мв). Ток I_c , вызванный межобмоточной емкостью, под действием результирующей разности потенциалов U_p индуктирует во вторичных обмотках добавочные э. д. с. E_{c3-4} и E_{c7-8} , которые в нашем случае взаимно компенсируются, и на выходе датчика результирующая э. д. с. равна нулю.

Катушка датчика с многослойными первичной и вторичной обмотками

При подсчете действующей емкости многослойной обмотки необходимо учитывать межслойную межобмоточную емкость и, в случае металлического каркаса катушки, также емкость на корпус.

Индуктируемая во вторичных обмотках э. д. с., созданная емкостными токами, будет складываться из двух или трех составляющих, сдвинутых между собой по фазе, а именно: возбуждаемых

межобмоточными, межслойными токами и, при металлическом каркасе, — токами на корпус.

Действующая межслойная емкость первичной или вторичной обмоток подсчитывается по формуле;

$$C_D = \frac{4(N-1)}{3} \cdot C_0 = \frac{4(N-1)}{3} \cdot 0,0885 \frac{\epsilon \cdot A}{\Delta} \cdot 10^{-12} [\phi], \quad (7)$$

где:

N — число слоев в обмотке,

ϵ — диэлектрическая проницаемость,

A — площадь соприкасающихся слоев по среднему диаметру в сантиметрах,

Δ — расстояние между медью проводников в сантиметрах.

Для многослойных катушек датчика, намотанных с разделенными первичной и вторичной обмотками, векторные диаграммы, в части направления индуцируемых емкостными токами э. д. с., можно строить лишь приближенно, учитывая межобмоточную емкость только для первого слоя между обмотками.

В многослойных катушках, намотанных в два параллельных провода, можно полностью учитывать межобмоточную емкость и строить векторные диаграммы.

На рис. 16 построена векторная диаграмма датчика с многослойными первичной и вторичной обмотками по опытным данным ($L = 30$ мм; $\omega_1 = 1000$; $\omega_2 = 4000$; $\varnothing 0,04$; $f = 20\,000$ гц; $S = 0$).

Первичная и вторичная обмотки намотаны в одном направлении, поэтому индуцируемая э. д. с. во вторичной обмотке имеет полярность, совпадающую с приложенным напряжением. Токи, протекающие через межобмоточную емкость, будут возбуждаться разностью потенциалов между зажимами 6—8 и 1—3. На рис. 17 дана диаграмма сложения э. д. с., возбуждаемых во вторичной обмотке всеми емкостными токами в первой секции датчика *). Межобмоточные токи учтены только для первых соприкасающихся слоев с напряжением на концах обмоток 6—8, равным на диаграмме вектору $\overline{U_1 - e_2}$ в произвольном масштабе, но с действительным соотношением U_1 и e_2 .

Результирующая э. д. с. складывается из четырех составляющих э. д. с., обусловленных емкостями: между обмотками $E_{СМО}$, на корпус катушки $E_{СК}$, между слоями первичной обмотки $E_{С1МС}$ и между слоями вторичной обмотки $E_{С2МС}$ с расчетными соотношениями между ними. На рис. 16 дана полная векторная диаграмма для того же датчика с многослойной обмоткой.

Для представления о возможной степени неидентичности намотки катушек, приведем данные измерения суммарной вторичной э. д. с. от емкостных токов для многослойной катушки: $L = 30$ мм; $\omega_1 = 1000$; $\omega_2 = 4000$; $\varnothing 0,04$ мм; с вынутым сердечником. Приложено напряжение $U_1 = 32$ в при $f = 20\,000$ гц (рис. 18.)

*) ($L = 30$ мм; $\omega_1 = 1000$; $\omega_2 = 4000$; $\varnothing 0,04$ мм; $S = 0$)

Питание подводится сначала к зажимам 2—3, а затем к 5—8; в том и другом случаях направления магнитных потоков, возбуждаемых первичной и вторичной обмотками, совпадают и они индуцируют

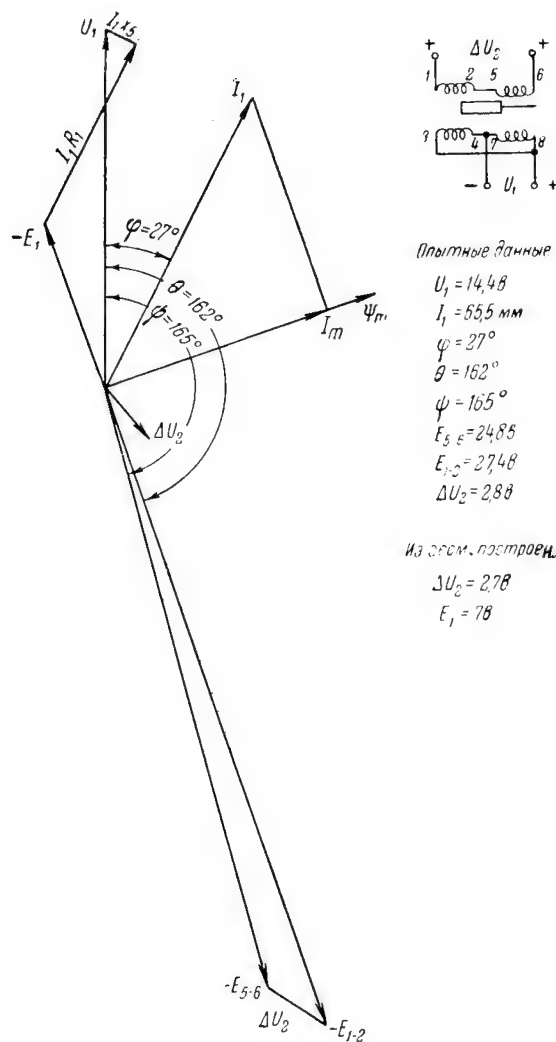


Рис. 16.

на вторичных обмотках э. д. с. $E_{1-2} = 0,82$ в и во второй секции $E_{5-6} = 1,45$ в, что составляет разницу около 75%.

Совпадающие направления магнитных потоков соответствуют нормальной работе датчика с согласной намоткой, с той разницей, что результирующая магнитодвижущая сила равномерно распределена по длине обмоток, а емкостные токи увеличены благодаря

тому, что номинальное напряжение приложено по всей длине обмотки. Однако это отличие не противоречит определению относительной разницы распределенных емкостей между отдельными секциями катушки датчика.

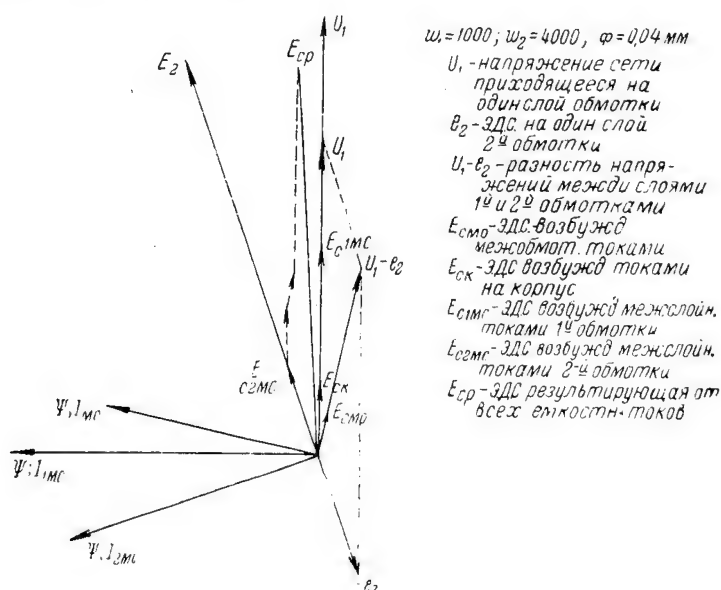


Рис. 17.

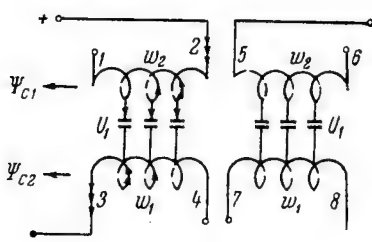


Рис. 18.

В рабочем режиме датчика, влияние емкостных токов сказывается на линейности характеристики и, особенно сильно, — вблизи нулевого положения якоря.

Выводы

1. Намотку катушек датчиков необходимо производить весьма тщательно, соблюдая идентичность укладки проводников и выводных концов.

2. В целях повышения чувствительности датчиков и расширения диапазона несущих частот до 20 000 гц и более, можно рекомендовать три способа намотки катушек:

а) одновременную намотку первичной и вторичной обмоток в два провода в одном направлении, с соединением средних точек секций по схеме рис. 4;

б) раздельную намотку первичной и вторичной обмоток в одном направлении с коэффициентом трансформации, близким к единице;

в) раздельную намотку первичной и вторичной обмоток в разных направлениях между собой и в секциях по рис. 10.

Особенно хорошие результаты можно получить с однослойными обмотками, позволяющими значительно повысить несущую частоту, без заметного разбаланса в нулевом положении якоря.

Обычно применяемые способы уменьшения межслойной емкости в катушках, путем секционирования обмоток, в применении к индукционному датчику малых габаритов не могут дать хорошего конструктивного решения.

3. Освещенный нами анализ емкостных токов в обмотках может быть применен при расчетах импульсных трансформаторов, трансформаторов повышенной частоты, индукционных датчиков с двумя катушками и в других случаях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Детали и элементы радиолокационных станций, Изд. „Советское радио“, тт. I и II, 1952.
2. Я. С. Ицхоки, Импульсная техника, изд. „Советское радио“, 1949.
3. Electronic Engineering, Winding Capacitance By N. H. Growhurst November, 1949.
4. Electronic, „Sensitive Transducer“, Vol. 21, September, pp. 136—142, 1949.
5. Seiens, A miniature pressure — recording device, 112, № 2910, pp. 404—405, 1950.

Поступила в марте 1957 года

Канд. техн. наук В. Н. РУДАКОВ
Канд. техн. наук Г. Я. МУРАВЬЕВА

О ВЛИЯНИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ФОРМУ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОГО АЛЮМИНИЯ В ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ ВАННАХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АЛЮМИНИЯ

В промышленных условиях алюминий получают в результате электролиза раствора глинозема в расплавленном криолите (Na_3AlF_6), к которому для уменьшения его температуры плавления добавляют

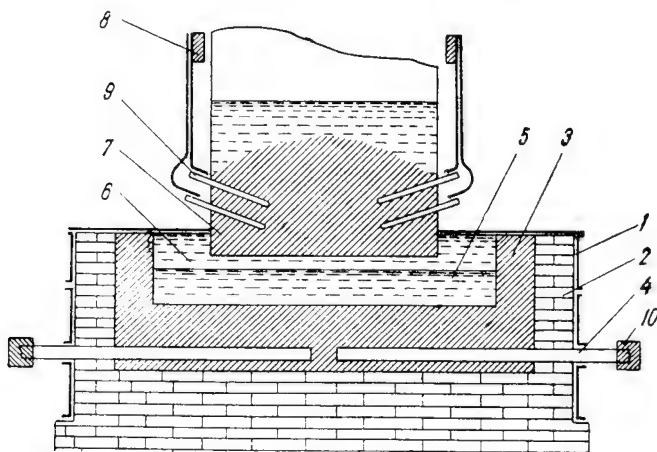


Рис. 1. Схематический поперечный разрез электролизной ванны

1 — кожух; 2 — кирпичная кладка; 3 — угольная футеровка; 4 — катодные стержни; 5 — жидкий алюминий; 6 — электролит; 7 — анод; 8 — анодная шина; 9 — анодные штыри; 10 — катодные шины

ряд примесей (обычно CaF_2). Этот раствор называют просто „электролитом“. Электролиз ведется в специальных электролизных ваннах (рис. 1) при температуре около 950°C , при которой как электролит, так и алюминий находятся в жидком состоянии.

В ближайшие годы в нашей стране производство алюминия должно значительно возрасти, это будет сделано не только за счет

увеличения числа электролизных ванн, но и за счет повышения их мощности. Обычное рабочее напряжение на ванне 4—4,5 в, плотность тока около одного ампера, поэтому увеличение мощности связано с ростом силы тока, а следовательно, и сечения ванны. У электролизных ванн больших размеров снижаются тепловые потери на теплообмен и поэтому уменьшается расход энергии на единицу получаемого алюминия.

Для нормальной работы электролизной ванны необходимо, чтобы расстояние от нижней поверхности (подшвы) анода до поверхности алюминия (междуполосное расстояние) было 4—4,5 см. Отклонение в ту или другую сторону приводит к перегреву ванны и повышает удельный расход энергии. Эксплуатационный опыт показывает, что при больших токах (50—60 килоампер и выше) возникают большие трудности в регулировании междуполосного расстояния, вследствие чего удельный расход энергии в более мощных ваннах может даже увеличиться.

Из ряда теоретических и экспериментальных исследований, проведенных у нас и за границей [1, 2, 3], следует, что при работе электролизных ванн возникают перекосы жидкого алюминия, одной из причин которых являются силы, действующие со стороны магнитного поля, связанного с токами, протекающими в электролизной ванне. Впервые смещение алюминия к одному из торцов ванны было экспериментально обнаружено в 1952 году у электролизных ванн с резко выраженной асимметрией в расположении ошиновки. Но в 1954 году П. А. Марчуком и А. Т. Мамонтовым то же явление было замечено и у обычных ванн. По систематизированным данным Г. В. Форсблома разность уровней алюминия у противоположных торцов ванны составляет в среднем 2,5 см, но в отдельных случаях достигает 5—6 см, а по данным М. Ф. Догромаджи даже 9—10 см.

В 1955—56 годах по инициативе Всесоюзного алюминиево-магниевого института (ВАМИ) под руководством и при участии М. Ф. Догромаджи (ВАМИ) и М. А. Гаврилова (Тяжпромэлектропроект) на электролизных ваннах ряда алюминиевых заводов были проведены одновременные измерения напряженности магнитного поля у подшвы анода и уровня жидкого алюминия. Полученные результаты в принципе подтверждают предположение, что одной из причин перекоса алюминия являются силы, действующие со стороны магнитного поля. Однако часто наблюдались не только количественные, но и качественные расхождения между распределением уровня алюминия, измеренным непосредственно и рассчитанным на основе экспериментально определенных значений напряженности магнитного поля. Это объясняется тем, что экспериментально невозможно отделить перекосы, вызванные магнитными полями и газовыделением. Вот почему оказалось необходимым провести возможно полное аналитическое решение задачи о распределении уровня алюминия под действием магнитных сил, которое отсутствует как в советской, так и иностранной литературе.

1. Распределение тока в отдельных элементах электролизной ванны

Для того, чтобы рассчитать магнитные поля в электролизной ванне, необходимо знать распределение токов в ее отдельных элементах. На рис. 2 показана одна из возможных схем питания электролизной ванны.

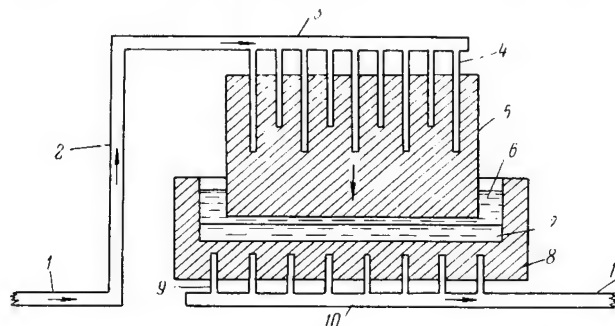


Рис. 2. Принципиальная схема питания электролизной ванны

1 и 11 — соединительные шины; 2 — анодный стояк; 3 — анодная шина; 4 — анодные штыри; 5 — анод; 6 — электролит; 7 — жидкий алюминий; 8 — угольная футеровка; 9 — катодные стойки; 10 — катодная шина

тролизной ванны. Электрический ток поступает по соединительным шинам от предыдущей ванны (ванны соединяются последовательно),

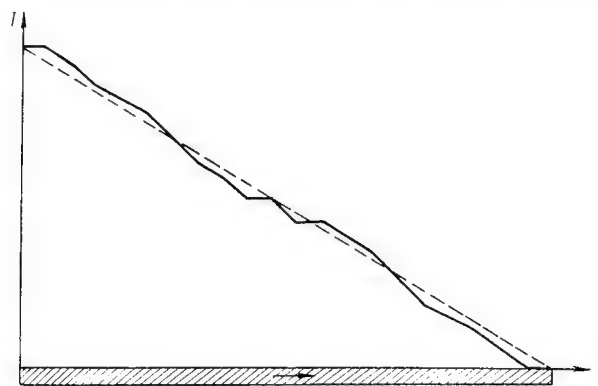


Рис. 3. Распределение тока вдоль анодной шины; сплошная линия — экспериментальные данные; пунктирная — принятое распределение для аналитического расчета напряженности магнитного поля

поднимается по анодным стоякам в анодные шины и от них через анодные штыри входит в анод. Затем, пройдя электролит, жидкий алюминий (катод) и угольную футеровку (подину), ток отводится

через катодные стержни в катодные шины, а от них через соединительные шины поступает в следующую ванну.

При расчете магнитных полей в расплаве (в электролите и жидком алюминии) сечением шин, анодных штырей и катодных

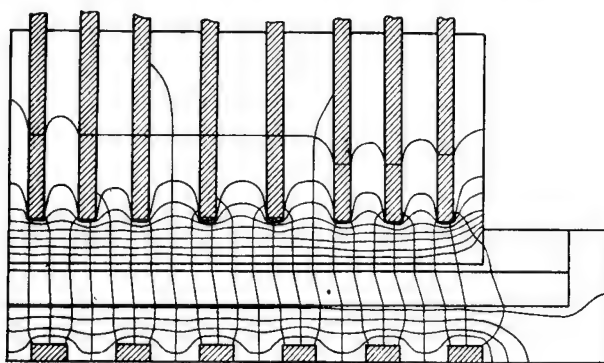


Рис. 4. Графическая картина распределения тока в продольном сечении электролизной ванны (правая половина)

стержней можно пренебречь, считая их линейными бесконечно тонкими проводниками. В соединительных шинах и анодных стояках величина тока I вдоль их длины не изменяется. На рис. 3, построенном на основании экспериментальных данных, полученных на одной из действующих ванн Уральского алюминиевого завода, показано, как изменяется величина тока вдоль анодных шин. Если совместить ось z с одной из таких шин, то закон распределения тока в ней может быть представлен формулой

$$I = az + b. \quad (1)$$

О распределении тока вдоль анодных штырей, катодных стержней, а также в аноде, расплаве и угольной футеровке экспериментальных данных нет. Для получения их мы применили метод электро-моделирования. Для построения электрической модели электролизера была использована песочная ванна К. И. Крылова [4]. Элементы электролизной ванны были изготовлены из смеси песка с графитом. Примеры графических картин полей токов, текущих в электролизных ваннах, показаны на рис. 4 и 5.

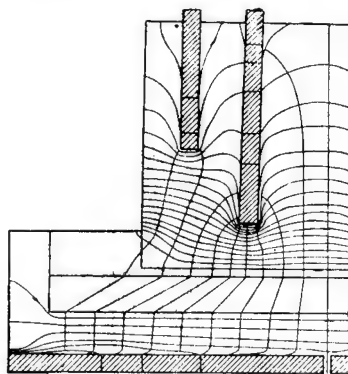


Рис. 5. Графическая картина распределения тока в поперечном сечении ванны (левая половина)

Применение песочной ванны позволило решить следующие задачи: 1) изучить распределение тока в аноде, электролите, жидком алюминии и угольной футеровке; 2) изучить распределение тока вдоль анодных штырей и катодных стержней; 3) выяснить, как изменяется распределение тока в указанных выше элементах при подъеме или спуске анодных штырей и при изменении уровня алюминия (в том числе при возникновении различного вида перекосов) в процессе работы ванны.

На рис. 6 показано распределение тока вдоль катодных стержней, полученное с помощью песочной ванны. Как видно, у конца стержня величина тока не изменяется (часть стержня изолирована), а дальше изменяется почти по линейному закону [формула (1)].

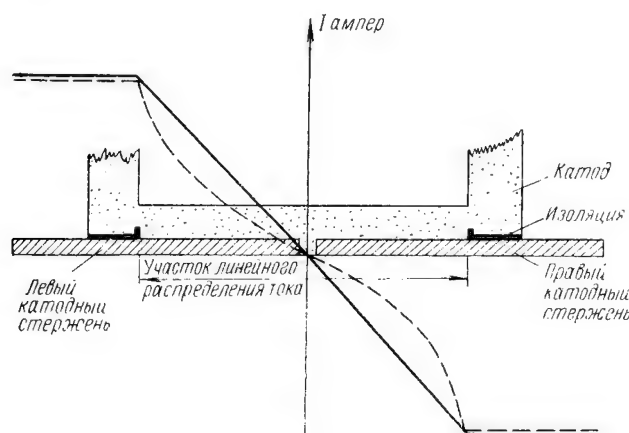


Рис. 6. Распределение тока вдоль катодных стержней. Пунктирная кривая получена на песочной ванне; сплошная — принятое распределение для аналитического расчета напряженности магнитного поля

Особенно сложной является картина растекания тока в аноде (включая анодные стержни), расплаве и угольной футеровке. В первом приближении при расчете магнитного поля этого тока мы приняли, что он равномерно распределен по сечению параллелепипеда, высота которого равна расстоянию от верхней части анода до катодных стержней, а площадь совпадает с площадью подошвы анода.

2. Расчет магнитного поля электролизной ванны

а) Напряженность магнитного поля токов, текущих в линейных проводниках конечной длины.

Пусть линейный проводник расположен параллельно оси z (рис. 7) так, что координаты его начала z_1, x_1, y_1 и конца z_2, x_1, y_1 . Величина тока при $z = z_1$ равна I_1 , в точке z_2 равна I_2 , а в про-

межутке между z_1 и z_2 изменяется по закону (1), где очевидно,

$$a = \frac{I_2 - I_1}{z_2 - z_1} \quad \text{и} \quad b = \frac{I_1 z_2 - I_2 z_1}{z_2 - z_1}. \quad (2)$$

Тогда, пользуясь законом Био-Савара-Лапласа, легко показать, что напряженность магнитного поля в точках с координатами x_0, y_0, z_0 равна

$$H = \frac{a}{c} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) + \frac{b + az_0}{cR_0} (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1), \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}, \quad c = 3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек.} \\ \cos \alpha_1 &= \frac{R_0}{R_1}, \quad \cos \alpha_2 = \frac{R_0}{R_2}, \quad \sin \alpha_1 = \frac{z_1 - z_0}{R_1}, \\ \sin \alpha_2 &= \frac{z_2 - z_0}{R_2}, \quad R_1 = \sqrt{R_0^2 + (z_1 - z_0)^2}, \quad R_2 = \sqrt{R_0^2 + (z_2 - z_0)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

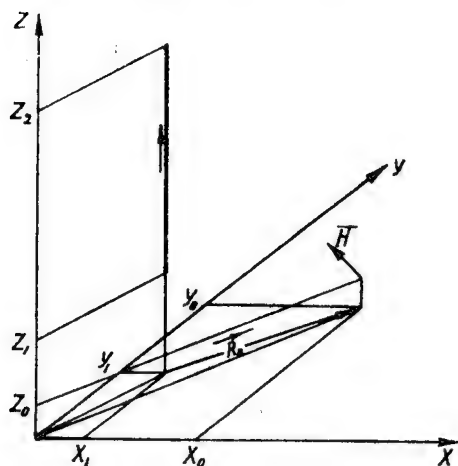


Рис. 7. К расчету магнитного поля линейного тока

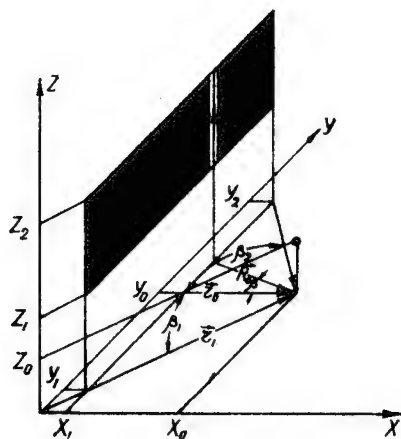


Рис. 8. К расчету магнитного поля плоского тока

Проекции вектора \vec{H} на оси координат определяются формулами:

$$H_x = -H \sin \beta, \quad H_y = H \cos \beta, \quad H_z = 0, \quad (5)$$

где

$$\cos \beta = \frac{x_0 - x_1}{R_0}, \quad \sin \beta = \frac{y_0 - y_1}{R_0}. \quad (6)$$

б) Напряженность магнитного поля токов, текущих в плоских проводниках конечных размеров.

Плоскими проводниками можно заменить систему, состоящую из большого числа параллельных линейных проводников, расположенных в одной плоскости.

Если стационарный ток I течет вдоль оси z в прямоугольной плоскости (рис. 8), координаты углов которой (z_1, x_1, y_1) , (z_2, x_1, y_1) , (z_2, x_1, y_2) и (z_1, x_1, y_2) , причем величина тока изменяется по тому же закону, что и в пункте a , то в точке с координатами (x_0, y_0, z_0) проекции вектора напряженности магнитного поля будут равны:

$$\left. \begin{aligned} H_x &= \frac{I}{c(y_2 - y_1)} \left\{ a[R_{121} - R_{111} - R_{122} + R_{112}] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{b + az_0}{2} [\eta_{121} - \eta_{111} - \eta_{122} + \eta_{112}] \right\} \\ H_y &= \frac{I}{c(y_2 - y_1)} \left\{ a[\varphi_{111} - \varphi_{121} - \varphi_{112} + \varphi_{122}] - \right. \\ &\quad \left. - (b + az_0) [\psi_{111} - \psi_{121} - \psi_{112} + \psi_{122}] \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где

$$\left. \begin{aligned} R_{1mn} &= \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_m - y_0)^2 + (z_n - z_0)^2}; \\ \eta_{1mn} &= \ln \frac{R_{1mn} + (z_n - z_0)}{R_{1mn} - (z_n - z_0)}; \\ \varphi_{1mn} &= (x_1 - x_0) \ln [(y_m - y_0) + R_{1mn}]; \\ \psi_{1mn} &= \arcsin \frac{(z_n - z_0)(y_m - y_0)}{\sqrt{R_{1mn}^2 - (y_m - y_0)^2} \sqrt{R_{1mn}^2 - (z_n - z_0)^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

в) Напряженность магнитного поля стационарного тока, текущего в прямоугольном параллелепипеде конечных размеров.

Напряженность магнитного поля в этом случае была определена нами лишь в точках, лежащих на основании параллелепипеда.

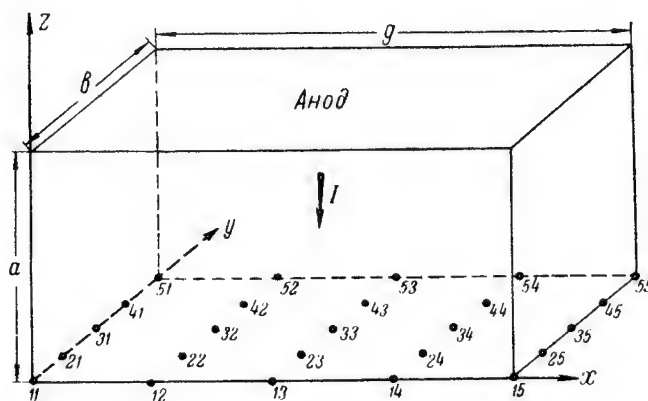


Рис. 9. К расчету магнитного поля объемного тока

Если же необходимо определить напряженность поля в других точках, то, разрезая исходный параллелепипед или добавляя к нему

другие параллелепипеды, можно свести такую задачу к задаче, результат решения которой приведен ниже.

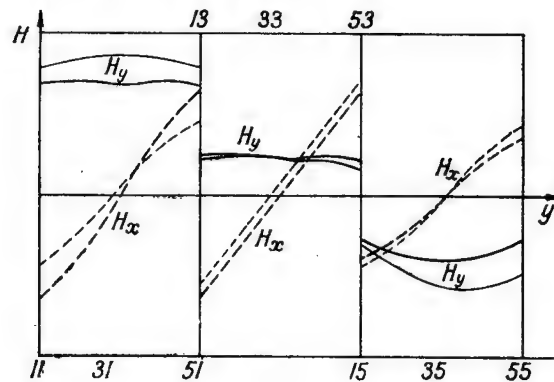


Рис. 10. Напряженность магнитного поля у подошвы анода электролизной ванны на линиях 11—51, 13—53 и 15—55 (см. рис. 9). Толстые линии — расчетные. Тонкие — экспериментальные

Итак, пусть стационарный ток, плотность которого $\delta = \text{const.}$, протекает вдоль оси z в прямом параллелепипеде (рис. 9). Длина его ребер вдоль осей x, y, z соответственно равна g, b, a . Тогда,

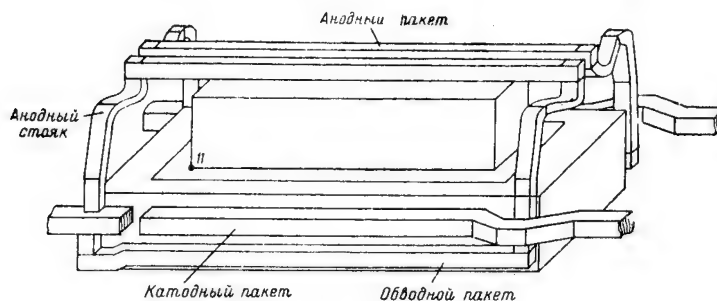


Рис. 11. Эскиз одного из вариантов электролизной ванны. (Отмечено положение точки 11 у подошвы анода)

как можно показать, проекции вектора напряженности магнитного поля в точках основания параллелепипеда с координатами $(x_0, y_0, z_0 = 0)$ равны:

$$\left. \begin{aligned} H_x &= \frac{\delta}{2c} \left(\Phi \Big|_{l_y=b-y_0}^{l_x=x_0} + \Phi \Big|_{l_y=b-y_0}^{l_x=g-x_0} - \Phi \Big|_{l_y=y_0}^{l_x=x_0} - \Phi \Big|_{l_y=y_0}^{l_x=g-x_0} \right) \\ H_y &= \frac{\delta}{c} \left(F \Big|_{l_y=b-y_0}^{l_x=x_0} + F \Big|_{l_y=b-y_0}^{l_x=g-x_0} - F \Big|_{l_y=y_0}^{l_x=x_0} - F \Big|_{l_y=y_0}^{l_x=g-x_0} \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где

$$\left. \begin{aligned}
 F &= l_x \arcsin \frac{al_y}{\sqrt{l_x^2 + a^2} \sqrt{l_x^2 + l_y^2}} - l_y \ln \frac{\sqrt{l_x^2 + a^2 + l_y^2} + a}{\sqrt{l_x^2 + a^2 + l_y^2} - a} \\
 &\quad - \frac{a}{2} \ln \frac{\sqrt{l_x^2 + a^2 + l_y^2} + l_y}{\sqrt{l_x^2 + a^2 + l_y^2} - l_y} \\
 \Phi &= l_x \ln \frac{\sqrt{l_x^2 + l_y^2 + a^2} - a}{\sqrt{l_x^2 + l_y^2 + a^2} + a} + l_y (\arcsin B + \arcsin A) - \\
 &\quad - 2a \ln \frac{l_x + \sqrt{l_x^2 + l_y^2 + a^2}}{\sqrt{l_y^2 + a^2}} \\
 A &= \frac{l_y^2 + a^2 + a \sqrt{a^2 + l_y^2 + l_x^2}}{\sqrt{l_y^2 + a^2}}, \quad B = \frac{a \sqrt{l_x^2 + l_y^2 + a^2} - (l_x^2 + a^2)^{**}}{(\sqrt{a^2 + l_y^2 + l_x^2} - a) \sqrt{a^2 + l_y^2}}.
 \end{aligned} \right\} (10)$$

Проекция напряженностей магнитного поля токов, протекающих в различных элементах электролизных ванн, определялись в двад-

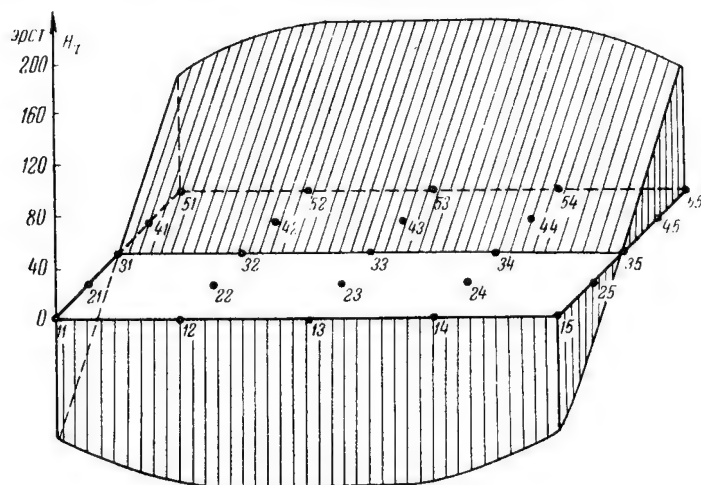


Рис. 12. Объемная диаграмма распределения H_x в плоскости подошвы анода

цати пяти точках, лежащих у подошвы анода (точки 11, 12, ... 54, 55 на рис. 9).

*) Подробнее метод расчета напряженности магнитного поля токов линейных проводников конечной длины, плоских проводников конечных размеров и прямоугольных параллелепипедов конечных размеров изложен в отчете по н/и работе „Расчет магнитных полей в электролизных ваннах для получения алюминия“, ЛЭТИ, 1956 г.

Для проверки предложенной выше методики расчета магнитного поля алюминиевых электролизеров были аналитически определены проекции вектора \vec{H} у подошвы анода одной из действующих ванн

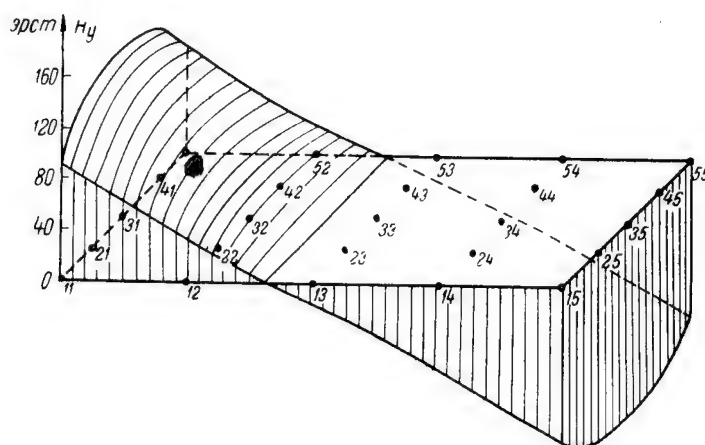


Рис. 13. Объемная диаграмма распределения H_y в плоскости подошвы анода

Уральского алюминиевого завода. На рис. 10 они сравниваются с экспериментальными данными, полученными сотрудниками Тяж-промэлектропроекта в октябре 1955 г. Как видно, между теоретическими и экспериментальными данными имеется удовлетворительное

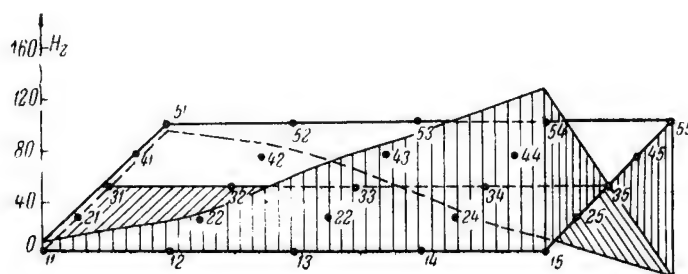


Рис. 14. Объемная диаграмма распределения H_z в плоскости подошвы анода

совпадение. Учитывая это, мы рассчитали магнитные поля также для ряда вариантов проектируемых электролизных ванн. На рис. 11 представлен эскиз одного из вариантов ванны, а на рис. 12, 13 и 14 объемные диаграммы проекций напряженности магнитного поля у подошвы ее анода.

3. Определение формы границы раздела электролит — алюминий

Задача определения формы границы раздела двух несмешивающихся несжимаемых жидкостей решается легко тогда, когда жидкости находятся в потенциальном силовом поле. Основным уравнением равновесия жидкостей в этом случае является уравнение Эйлера:

$$\text{grad } p = \vec{F} = -\text{grad } \varphi, \quad (12)$$

где

p — гидростатическое давление;

\vec{F} — сила, действующая на единицу объема жидкости;

φ — скалярный потенциал силового поля.

Можно показать, что поле сил, действующих на расплав (электролит и жидкий алюминий) в общем случае не является потенциальным.

Сила \vec{F} , действующая на единицу объема расплава, складывается из силы тяжести

$$\vec{f}_3 = \rho \cdot \vec{g} \quad (13)$$

и силы Лоренца

$$\vec{f} = \frac{1}{c} [\vec{\delta} \vec{H}], \quad (14)$$

т. е.

$$\vec{F} = \rho \vec{g} + \frac{1}{c} [\vec{\delta} \vec{H}], \quad (15)$$

где

ρ — плотность жидкости;

\vec{g} — ускорение силы тяжести;

$\vec{\delta}$ — плотность тока;

\vec{H} — напряженность магнитного поля;

$c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек — электродинамическая постоянная; магнитная проницаемость электролита и алюминия (μ) практически равна единице.

Сила \vec{F} имела бы скалярный потенциал, если бы $\text{rot } \vec{F} = 0$.

$$\left. \begin{aligned} \text{rot } \vec{F} &= \text{rot } (\rho \vec{g}) + \text{rot } \left\{ \frac{1}{c} [\vec{\delta} \vec{H}] \right\}, \\ \text{rot } (\rho \vec{g}) &= 0, \quad \text{так как } \vec{g} = \text{const.} \\ \text{rot } \left\{ \frac{1}{c} [\vec{\delta} \vec{H}] \right\} &= \frac{1}{c} \{ (\vec{H} \text{ grad}) \vec{\delta} - (\vec{\delta} \text{ grad}) \vec{H} + \vec{\delta} \text{ div } \vec{H} - \vec{H} \text{ div } \vec{\delta} \}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$\text{div } \vec{H}$ всегда равна нулю для стационарного тока и $\text{div } \vec{\delta} = 0$, поэтому

$$\text{rot } \vec{F} = \frac{1}{c} \{ (\vec{H} \text{ grad}) \vec{\delta} - (\vec{\delta} \text{ grad}) \vec{H} \}. \quad (17)$$

Так как $\vec{\delta}$ и \vec{H} являются функциями x , y и z (см. выше), то правая часть в (17) отлична от нуля. Силовое поле в расплаве не является потенциальным. Вследствие этого, как мы покажем ниже, в электролизной ванне возникают циркуляционные потоки жидкостей.

Учитывая большие трудности решения общей задачи о движении неоднородной жидкости в ограниченном пространстве в непотенциальном силовом поле, решим задачу в первом приближении, положив

$$\operatorname{rot} \vec{F} = 0. \quad (18)$$

Возникающую при этом ошибку можно свести к минимуму методом регулирования результатов расчета (см. ниже).

Итак, пусть две несмешивающиеся несжимаемые жидкости различной плотности ρ_1 и ρ_2 находятся в равновесии в потенциальном силовом поле. Тогда вдоль любой кривой l , проведенной вдоль границы их раздела s , должно иметь место равенство:

$$\operatorname{grad}_l p_1 = \operatorname{grad}_l p_2 \quad (19)$$

или, если обозначить через $d\varphi$ изменение потенциала (разность потенциалов) на участке dl , то

$$d\varphi_1 = d\varphi_2. \quad (20)$$

Из (20) и (12) найдем следующее условие равновесия:

$$(F_{x_1} - F_{x_2}) dx_s + (F_{y_1} - F_{y_2}) dy_s + (F_{z_1} - F_{z_2}) dz_s = 0, \quad (21)$$

где x_s , y_s , z_s — координаты точек поверхности s .

Так как в выбранной нами системе координат (см. выше) сила тяжести направлена против оси z , то из (15) получим:

$$F_x = f_x, \quad F_y = f_y, \quad F_z = f_z - \rho g,$$

где

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{1}{c} (\partial_y H_z - \partial_z H_y), \\ f_y &= \frac{1}{c} (\partial_z H_x - \partial_x H_z), \\ f_z &= \frac{1}{c} (\partial_x H_y - \partial_y H_x), \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

поэтому (21) окончательно переписывается так:

$$(f_{x_1} - f_{x_2}) dx_s + (f_{y_1} - f_{y_2}) dy_s + [(f_{z_1} - f_{z_2}) - g(\rho_1 - \rho_2)] dz_s = 0. \quad (21a)$$

Из уравнения (21a) следует, что разность уровней жидкого алюминия в точках, отстоящих на расстоянии

$$dr = \sqrt{dx_s^2 + dy_s^2}$$

друг от друга, равна

$$dz_s = \frac{(f_{x_1} - f_{x_2}) dx_s + (f_{y_1} - f_{y_2}) dy_s}{-(f_{z_1} - f_{z_2}) + g(\rho_1 - \rho_2)}. \quad (23)$$

По данным ВАМИ разность плотностей жидкого алюминия и электролита при рабочей температуре в ванне ($\sim 950^\circ\text{C}$) равна $\rho_1 - \rho_2 \sim 0,21 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, следовательно, $(\rho_1 - \rho_2)g \sim 206 \frac{\text{дин}}{\text{см}^3}$. Кроме того, вязкость электролита значительно выше вязкости жидкого алюминия. Последнее, как можно показать, приводит к тому, что действием сил f_{x_2} и f_{y_2} практически можно пренебречь. Учитывая сказанное выше, вместо (23) получим:

$$dz_s = \frac{f_{x_1} dx_s + f_{y_1} dy_s}{206 - (f_{z_1} - f_{z_2})}. \quad (24)$$

Формула (24) и была положена нами в основу расчета формы границы раздела электролит — жидкий алюминий, которая устанавливается в электролизной ванне под влиянием магнитного поля.

С целью проверки справедливости формулы (24) мы определили формы границ раздела для нескольких действующих электролизных ванн (№ 211-КАЗ, № 52-УАЗ, № 144-опытная). На рис. 15 показана граница раздела по периметру ванны № 52 (сплошная линия). Пунктирная линия построена по усредненным экспериментальным данным, полученным старшим научным сотрудником ВАМИ — М. Ф. Догромаджи. Совпадение теоретических и экспериментальных результатов для всех указанных выше ванн оказалось

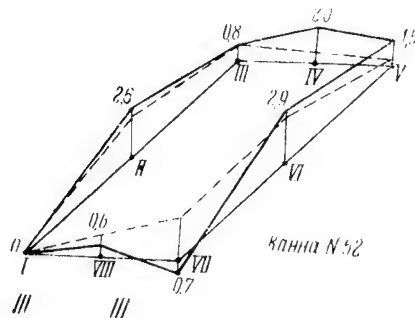


Рис. 15. Граница раздела электролит — алюминий в ванне № 52. Пунктир — экспериментальные данные ВАМИ; сплошная линия — по расчету авторов; цифрами показаны превышения уровней по отношению к точке I

удовлетворительным. Учитывая это, мы рассчитали возможные формы границ раздела электролит — жидкий алюминий в трех вариантах проектируемых ванн, отличающихся друг от друга конструкцией ошинок, для того, чтобы выбрать вариант с наиболее благоприятным распределением уровня алюминия. Прежде всего определялась разность уровней Δz_s в точках, расположенных вдоль линий, параллельных оси x (11-15, 21-25, 31-35, 41-45 и 51-55 на рис. 9). В этом случае $\Delta y_s = 0$ и из (24) находим, что

$$\Delta z_s = \frac{f_{x_1}}{206 - (f_{z_1} - f_{z_2})} \Delta x_s. \quad (25)$$

Величины f_x и f_z находились по формулам (22), в которые подставлялись значения плотности тока δ и напряженности магнитного поля H , определенные по изложенной выше методике (см. пункты 1 и 2). Полученные результаты „регулировались“ с учетом сил, действующих вдоль оси y , что позволило установить также схему циркуляционных потоков в жидком алюминии.

На рис. 16, 17 и 18 показаны формы границ раздела (распределение уровня алюминия) в различных вариантах проектируемых

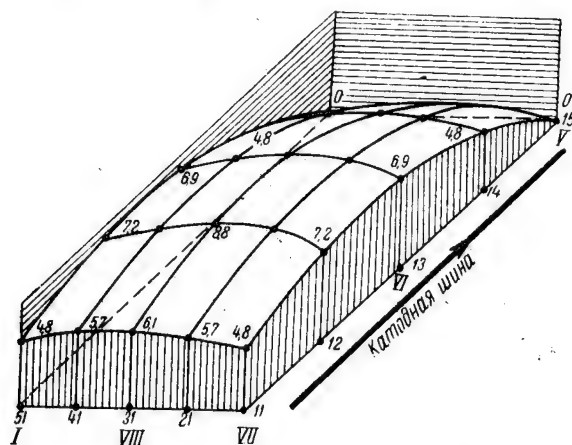


Рис. 16. Формы границ раздела электролит — алюминий в проектируемых ваннах (а, б, в)
Вариант с двухсторонним подводом тока (I)

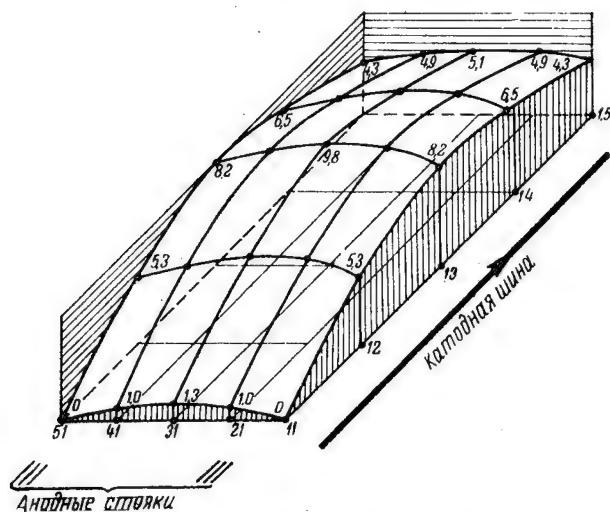


Рис. 17. Форма границ раздела электролит — алюминий в проектируемых ваннах
Вариант с односторонним подводом и отводом тока (II)

ванн, а на рис. 19 — схемы циркуляций жидкого алюминия в них. Как видно из рисунков, перекосы алюминия в проектируемых мощных электролизных ваннах могут быть значительными, если не изменить конструкции их ошинок.

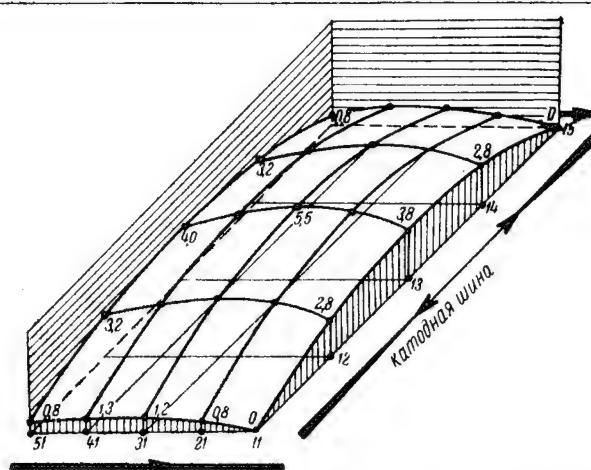


Рис. 18. Форма границ раздела электролит — алюминий в проектируемых ваннах
Вариант с двухсторонним подводом и отводом тока (III)

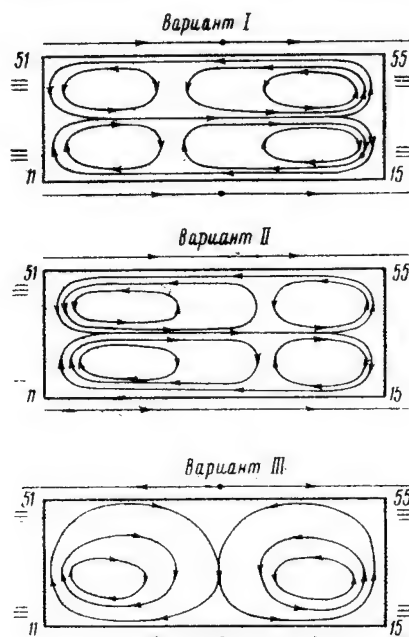


Рис. 19. Схемы циркуляционных потоков жидкого алюминия в проектируемых ваннах различных вариантов. Тремя штрихами обозначены анодные стояки, стрелками на прямых линиях — направление тока в катодных шинах

Настоящая работа не ставит своей задачей разработку какой-либо конкретной конструкции ошиновки, так как необходимо учитывать не только наиболее рациональное распределение магнитного поля, но и экономию материалов, минимальные потери энергии в шинах, удобство подхода к ваннам и т. д., поэтому она ограничивается лишь общими рекомендациями, которые следует принять во внимание конструкторам.

Идеальное решение задачи устранения влияния магнитных полей заключалось бы в создании бифилярных шин и специальных контуров, компенсирующих влияние магнитных полей объемных токов. Однако это приведет к тому, что ошиновки ванн будут чрезвычайно громоздкими и дорогостоящими, а потери энергии в них превысят расход энергии в процессе электролиза. Нам кажется поэтому, что необходимо эту задачу решать иными путями.

Во-первых, конструкция ошиновки должна быть такой, что влияние магнитных полей одной части ее элементов, а также объемных токов, должно компенсироваться (вероятно частично) влиянием магнитных полей других элементов. Предложенная нами методика расчета магнитных полей и уровня алюминия облегчит разработку такой конструкции, так как она позволяет оценить влияние магнитного поля тока, идущего в каждом элементе ошиновки.

Во-вторых, следует дробить и рассредоточивать шинопроводы. В этом отношении наиболее целесообразен двухсторонний подвод и отвод тока.

В-третьих, ванны в группах должны располагаться так, чтобы токи в шинах соседних ванн текли в противоположные стороны.

В-четвертых, шинопроводы, влияние магнитных полей токов которых нельзя скомпенсировать (например, обводные шины) необходимо располагать возможно дальше от расплава.

В выполнении работы, результаты которой изложены в настоящем сообщении, существенную помощь оказали: ассистент кафедры ТОЭ М. П. Цизмер и аспирант кафедры РТЭ А. Г. Бонч-Осмоловский. Авторы выражают им свою глубокую благодарность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Форсблом, Некоторые случаи влияния электромагнитных полей на работу алюминиевого электролизера, отчет по н/н работе, ВАМИ.
2. J. Wengel, Forze elettromagnetiche nei grandi forni per l'Alluminio, „Alluminio“, v. 22, n. 6, Dec. 1953, p. 619—769, Simposium sull' elettrolisi dell' alluminio, Milano, 12—14, ottobre, 1953.
3. R. Jötten, Campi magnetici nei grandi forni per l'elettrolisi dell' alluminio e loro azione, „Alluminio“, v. 22, n. 6, Dec. 1953, p. 619—769, Simposium sull' elettrolisi dell' alluminio, Milano, 12—14, ottobre, 1953.
4. К. И. Крылов и Я. П. Ковалевская, Снятие картин электрических полей в неоднородных средах, Изв. ЛЭТИ, Выпуск XXIV, стр. 126, 1951.
5. М. Ф. Догромаджи, и В. Н. Рудаков, Магнитное поле и состояние поверхности расплавленного металла в электролизной ванне, „Цветные металлы“, № 5, 1957.

Поступила в январе 1957 г.

Докт. техн. наук, проф. К. И. КРЫЛОВ

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

§ 1. Введение

В последнее время самое широкое внимание привлекают вопросы, связанные с использованием радиоволн, длина которых короче одного сантиметра, т. е. миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

Среди многочисленных нерешенных проблем в области миллиметровых волн, самой важной является их получение.

Обычные методы генерирования электромагнитных волн сверх-высокой частоты при помощи клистронов, маячковых ламп, ламп с бегущей электромагнитной волной и ламп обратной волны встречают все большие и большие затруднения по мере укорочения длины волны, и для генерирования электромагнитных волн короче одного миллиметра эти методы оказываются неприемлемыми. Дело в том, что во всех перечисленных типах генераторных ламп используется взаимодействие электронного потока с полем зарядов резонирующей или замедляющей системы. Это взаимодействие приводит к группированию электронного потока в сгустки, которые передают свою энергию резонирующей или замедляющей системе. Затем электроны резонирующей системы, придя в колебательное движение, отдают энергию в виде высокочастотного поля.

При уменьшении длины волны:

1. Уменьшается объем резонирующих систем, вместе с тем уменьшается энергия, запасенная в резонаторе, а, следовательно, и отдаваемая резонатором мощность электромагнитных колебаний. Так, например, резонатор на длину волны, равную нескольким *мм*, имеет геометрические размеры также всего в несколько миллиметров.
2. Возникают значительные трудности при изготовлении резонаторов такого размера.
3. Добротность резонатора падает при укорочении длины волны.

4. Уменьшается объем пучка электронов, взаимодействующего с полем резонирующей системы. Это происходит не только потому, что уменьшаются геометрические размеры пучка, но также и потому, что поле резонирующей системы, взаимодействующее с пучком, уменьшается с расстоянием по экспоненциальному закону, причем показатель степени у экспоненты пропорционален частоте колебаний. Так, например, при $\lambda = 1$ мм, на расстоянии 0,1 мм от замедляющей системы электрическое поле оказывается в 500 раз слабее, чем на поверхности системы. Электроны при этом будут взаимодействовать с полем только тогда, когда расстояние от электрона до замедляющей системы будет намного меньше 0,1 мм. Таким образом, при укорочении длины волны значительно уменьшается объем, в котором происходит взаимодействие электронного пучка с полем резонатора. Вместе с тем практически осуществить взаимодействие оказывается возможным только с большим трудом, и при этом значительная часть электронов попадает на замедляющую систему.

5. С уменьшением длины волны возникает затруднение в осуществлении обратной связи, обеспечивающей процесс группирования электронного потока.

Перечисленным выше не исчерпываются затруднения генерирования электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов обычными способами; вместе с тем уже из изложенного становится ясным, почему классические методы оказываются неприемлемыми для решения поставленной задачи. В связи с этим естественно возник вопрос об изыскании новых методов генерирования электромагнитных волн указанного выше диапазона, таких методов, которые были бы свободны от указанных выше недостатков.

На один из способов получения электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов без резонирующих или замедляющих систем автором настоящей статьи было указано около двадцати лет тому назад. *) Этот способ заключается в получении излучения непосредственно от ускоренно движущихся электрических зарядов. В этом направлении еще в довоенные годы в ЛЭТИ были проведены первые экспериментальные работы, но, к сожалению, этот вопрос отчасти из-за условий военного времени не получил должного развития и теперь мы снова к нему возвращаемся вместе с возросшим к нему вниманием как у нас, так и во всех других странах.

Ниже приводятся основные теоретические обоснования указанного метода, а также сообщается об экспериментальных работах, проведенных автором.

§ 2. Излучение ускоренно движущимся электроном

Если на основании классической электродинамики произвести расчет электромагнитного поля произвольно движущегося

*) См. отчет ОНИР ЛЭТИ, 1938 г.

электрического заряда, то напряженности полей будут определяться следующими выражениями:

$$\vec{E} = -\frac{eR\vec{v}}{c^2\left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^2} + \frac{eR}{\left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^3} \left(\frac{\vec{R}}{R} - \frac{\vec{v}}{c}\right) \left(1 - \frac{v^2}{c^2} - \frac{(\vec{R}\vec{v})}{c^2}\right), \quad (1)$$

$$\vec{H} = -\frac{e}{c^2} \frac{[\vec{R}\vec{v}]}{\left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^2} + \frac{e[\vec{v}\vec{R}]}{c\left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^3} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{(\vec{R}\vec{v})}{c^2}\right), \quad (2)$$

где

e — величина электрического заряда;
 R — расстояние от заряда до точки, где определяется поле;
 \vec{v} — скорость движущегося заряда;
 $\dot{\vec{v}}$ — его ускорение;
 c — скорость света.

Каждое из полей \vec{E} и \vec{H} может быть представлено в виде суммы двух полей \vec{E}_1 , \vec{E}_2 и \vec{H}_1 , \vec{H}_2 , где

$$\vec{E}_1 = \frac{e}{\left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^3} \left(\vec{R} - \vec{v} \frac{R}{c}\right) \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right); \quad (3)$$

$$\vec{H}_1 = -\frac{e}{\left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^3} \left[\left(\vec{R} - \vec{v} \frac{R}{c}\right) \frac{\vec{v}}{c}\right] \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = \left[\frac{\vec{v}}{c} \vec{E}\right]; \quad (4)$$

$$\vec{E}_2 = -\frac{eR}{c^2} \frac{\vec{v}}{\left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^2} + \frac{eR(\vec{R}\vec{v})}{c^2\left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^3} \left(\frac{\vec{R}}{R} - \frac{\vec{v}}{c}\right); \quad (5)$$

$$\vec{H}_2 = -\frac{e[\vec{R}\vec{v}]}{c^2\left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^2} + \frac{e[\vec{v}\vec{R}]}{c\left(R - \frac{\vec{R}\vec{v}}{c}\right)^3} \frac{(\vec{R}\vec{v})}{c^2} = \left[\frac{\vec{R}}{R} \vec{E}_2\right]. \quad (6)$$

\vec{E}_1 и \vec{H}_1 представляют собой не что иное, как электромагнитное поле равномерно и прямолинейно движущегося заряда со скоростью \vec{v} . Оно убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от заряда и при $\vec{v} = 0$ обращается в статическое поле

$$\vec{E}_{1(v=0)} = \frac{e\vec{R}}{R} \quad \text{и} \quad \vec{H}_{1(v=0)} = 0.$$

Это поле, как бы движущееся вместе с зарядом, может быть названо полем „квазистатическим“.

Вторая часть электромагнитного поля, описываемая уравнениями (5) и (6), зависит от ускорения заряда \vec{v} . Оно существенно отличается от поля \vec{E}_1 и \vec{H}_1 . Величина напряженности его убывает обратно пропорционально первой степени расстояния от заряда, вектора \vec{E}_2 и \vec{H}_2 перпендикулярны к радиусу вектору \vec{R} . Это поле представляет собой электромагнитную волну, испускаемую движущимся с ускорением зарядом. Поле \vec{E}_2 , \vec{H}_2 обращается в нуль, если $\vec{v} = 0$.

На далеком расстоянии от заряда поле \vec{E}_2, \vec{H}_2 (волновое поле) преобладает над полем \vec{E}_1, \vec{H}_1 (квазистатическим).

Таким образом, мы приходим к заключению, что при всяком ускоренном движении непосредственно от электрического заряда испускается электромагнитная волна, энергия которой, определяемая потоком вектора Умова — Пойтинга

$$\vec{S} = \frac{c}{4\pi} [\vec{E}\vec{H}] = \frac{c}{4\pi} \vec{E}_2 \frac{\vec{R}}{R}, \quad (7)$$

зависит в первую очередь от ускорения заряда. Поле \vec{E}_1, \vec{H}_1 мы в дальнейшем интересоваться не будем.

Полная энергия, излучаемая в единицу времени (интенсивность излучения) ускоренно движущимся зарядом, находится путем интегрирования по замкнутой поверхности уравнения (7) и оказывается равной

$$-\frac{dW}{d\tau} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} \frac{\vec{v}^2 - \frac{[\vec{v}\vec{v}]^2}{c^2}}{(1 - \beta^2)^3}. \quad (8)$$

Заметим, что интенсивность излучения помимо ускорения зависит еще от энергии движущегося заряда и величины заряда.

Из предыдущих формул можно вывести также и распределение излучения в пространстве, т. е. определить диаграмму направленности.

Интенсивность излучения в телесный угол $d\Omega$ равна

$$dI = \frac{e^2}{4\pi c^3} \left\{ \frac{2 \left(\frac{\vec{R}}{R} \frac{\vec{v}}{v} \right) \left(\frac{\vec{v}}{v} \frac{\vec{v}}{v} \right)}{c \left(1 - \frac{\vec{R} \vec{v}}{Rc} \right)^5} + \frac{\frac{\vec{v}}{v^3}}{\left(1 - \frac{\vec{R} \vec{v}}{Rc} \right)^4} - \frac{\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) \left(\frac{\vec{R}}{R} \frac{\vec{v}}{v} \right)^2}{\left(1 - \frac{\vec{R} \vec{v}}{Rc} \right)^6} \right\} d\Omega. \quad (9)$$

Спектральный состав излучения зависит в первую очередь от того, является ли движение заряда периодическим или непериодическим. В случае периодического движения излучается дискретный спектр, в случае непериодического движения, как, например, столкновение заряженной частицы, излучается сплошной спектр.

Рассмотрим теперь частный случай излучения электромагнитной волны при равномерном торможении электрического заряда.

§ 3. Излучение при торможении электрических зарядов

Процесс торможения мы можем рассматривать в первом приближении, как движение электрона с постоянным отрицательным ускорением, действующим в течение малого промежутка времени.

Торможение электрона не является периодическим процессом и поэтому излученный при торможении импульс эквивалентен излучению непрерывного спектра.

Разлагая импульс в интеграл Фурье, можно найти распределение энергии в спектре. Очевидно, разложение это, а следовательно, и распределение энергии в спектре, будет зависеть от характера торможения, т. е. формы импульса: для импульса частного вида, имеющего место при $\vec{v} = \text{const}$, т. е. в случае, когда ускорение остается постоянным в течение всего времени торможения, напряженность электрического поля может быть представлена, как интеграл следующего вида

$$\frac{2E}{\pi} \int_0^{\infty} \sin \nu \frac{\tau}{2} \cos \nu t d\nu,$$

где

τ — время торможения заряда;

ν — частота электромагнитного излучения.

Отсюда следует, что распределение энергии в спектре удовлетворяет следующему уравнению

$$J_{\lambda} = k \sin^2 \left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \right), \quad (10)$$

где

k — коэффициент пропорциональности;

λ — длина волны;

J_{λ} — интенсивность соответствующей длины волны;

δ — геометрическая ширина излучаемого при торможении электромагнитного импульса.

Из формулы (8) видно, что при $\lambda = \lambda_m = 2\delta$ интенсивность принимает максимальное значение, но, кроме того, имеется и еще ряд длин волн, определяемых из условия

$$\lambda = \frac{2\delta}{2n+1},$$

где

$n = 1, 2, 3 \dots$, для которых интенсивность также принимает максимальное значение.

На рис. 1 представлена зависимость $J_\lambda = f(\lambda)$, из которой видно, что значительная часть всей излучаемой энергии приходится на интервал длин волн вблизи

$$\lambda = \lambda_m = 2\delta.$$

Так как ширина импульса зависит от времени торможения, то и длина волны, на которую приходится максимальная интенсивность излучения, также определяется временем торможения электрона.

Таким образом, можно создать такие физические условия, при которых время торможения будет соответствовать излучению электромагнитного импульса, максимальная интенсивность излучения в котором придется на миллиметровый или субмиллиметровый диапазон.

Определим теперь общее количество энергии, излучаемое электроном при торможении.

Из формулы (8) следует, что в частном случае $\vec{v} \parallel \vec{\dot{v}}$ общая излученная электроном энергия при потере его скорости от v до 0, т. е. до полной его остановки, равняется

$$W = \frac{2}{3} \frac{v^2 e^2}{c^3 (1 - \beta^2)^{3/2} \tau}, \quad (11)$$

где

τ — время торможения электрона; или при $v \ll c$ (нерелятивистский случай)

$$W = \frac{2}{3} \frac{v^2 e^2}{c^3} \frac{1}{\tau}. \quad (12)$$

Таким образом, общая энергия излучения существенно зависит от первоначальной энергии электронов и времени торможения.

Из формулы (11) следует, что так как время торможения τ определяет длину излучаемой волны λ_m и при поставленной задаче генерирования миллиметровых или субмиллиметровых волн должно быть задано, то для получения возможно большей энергии излучения необходимо оперировать с электронами больших скоростей.

Диаграмма направленности излучения определяется формулой (9), из которой следует, что в рассматриваемом нами случае $(\vec{v} \parallel \vec{\dot{v}})$, энергия излучения под углом θ к направлению ускорения оказывается равной

$$\frac{dI}{d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi c^3} \frac{\dot{v}^2}{v^2} \frac{\sin^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^5}. \quad (13)$$

При малых скоростях интенсивность излучения в единицу телесного угла Ω равняется

$$\frac{dI}{d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi c^3} \frac{\dot{v}^2}{v^2} \sin^2 \theta. \quad (14)$$

На рис. 2 приведена диаграмма направленности при различных значениях $\beta = \frac{v}{c}$. Из рисунка видно, что при малых скоростях излучение имеет максимум в плоскости, перпендикулярной мгновенному ускорению. При увеличении скорости заряда происходит изменение диаграммы направленности и при релятивистских скоростях направление максимального излучения почти параллельно мгновенной скорости заряда.

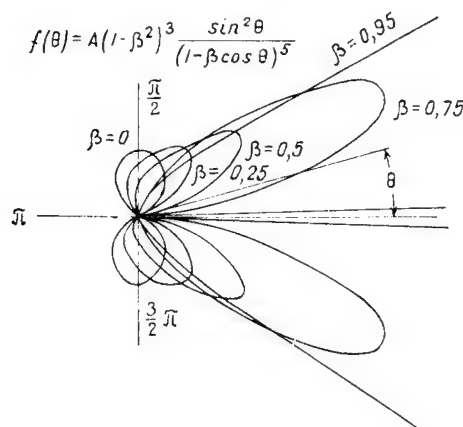


Рис. 2.

Заканчивая рассмотрение возможности получения электромагнитного излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона методом торможения электронов, следует иметь также в виду, что при этом способе помимо основной длины волны λ_m , на которую приходится максимальная интенсивность, будут излучаться и соседние длины волн, то есть будет генерироваться „шум“.

§ 4. О получении электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона методом торможения электронов в поле плоского конденсатора

На основании приведенных в предыдущих параграфах теоретических соображений нам представлялся возможным следующий способ получения электромагнитных колебаний высокой частоты.

Электроны, испускаемые катодом K (рис. 3), пройдя разность потенциалов U , пролетают по инерции сквозь отверстие диафрагмы и попадают в область тормозящего поля, созданного между электродами A и B , где, теряя скорость, излучают электромагнитный импульс. Если сделать электроды A и B плоскими, то тормозящее поле будет однородным, а само торможение равномерным. Для этого случая, как мы видели в § 3, длина волны на которую приходится максимум интенсивности

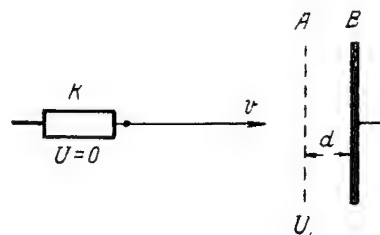


Рис. 3.

$$\lambda_m = 2c\tau. \quad (15)$$

Из этой формулы видно, что для получения λ_m достаточно малой величины время торможения электрона должно быть мало, так, например, для $\lambda_m = 1 \text{ мм}$ оно должно быть равным

$$\tau = \frac{\lambda_m}{2c} = \frac{0,1}{2 \cdot 3 \cdot 10^{10}} = 1,6 \cdot 10^{-12}.$$

Для рассматриваемого нами случая равномерного торможения время торможения:

$$\tau = \frac{v}{\dot{v}}. \quad (16)$$

Для того, чтобы τ было мало, необходимо чтобы v было мало, либо \dot{v} велико.

С другой стороны, согласно формуле (11) количество излученной электроном энергии пропорционально его начальной скорости и ускорению; таким образом, уменьшение τ за счет увеличения ускорения является как раз благоприятным случаем. Снижение же v , как видно из той же формулы, привело бы к меньшим значениям излучаемой энергии при той же длине волны λ_m .

Обозначим ускоряющий потенциал между катодом и пластиной A через U_1 , расстояние между пластинами AB — через d и пусть задерживающий потенциал между пластинами AB равняется U_2 . Тогда скорость электрона v , в момент прохождения им диафрагмы:

$$v = \sqrt{\frac{2eU_1}{m}}, \quad (17)$$

где

e — заряд электрона $= 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE}$,

m — его масса $= 9 \cdot 10^{-28} \text{ г}$.

Задерживающая сила F , действующая на электрон, когда он находится между пластинами AB

$$F = m\dot{v} = eE,$$

где напряженность тормозящего поля

$$E = \frac{U_2}{d}.$$

Отсюда находим

$$\dot{v} = \frac{eU_2}{md}. \quad (18)$$

Подставляя значения v и \dot{v} из (17) и (18) в формулы (15) и (16), находим, что

$$\tau = \sqrt{\frac{2m}{e}} d \frac{\sqrt{U_1}}{U_2}, \quad (19)$$

$$\lambda_m = 2c \sqrt{\frac{2m}{e}} d \frac{\sqrt{U_1}}{U_2}. \quad (20)$$

Из (20) видно, что для получения короткой длины волны λ_m достаточной интенсивности необходимо, чтобы U_2 было велико, а U_1 по возможности мало. При этом уменьшение U_1 является нежелательным обстоятельством, приводящим к уменьшению излучаемой энергии. Применение же малых d с большим U_2 практически ограничивается пробоем между электродами AB . Поэтому, приходя к данному заключению, мы провели ориентировочные исследования по величине пробивного напряжения в вакууме между плоскими электродами. На основании этих исследований мы пришли к заключению, что, если произвести тщательное обезгаживание электродов и стекла колбы, в которой производятся исследования, то градиенты поля между электродами могут быть очень высоки. Практически оказалось возможным, при расстоянии между пластинами $d = 0,3$ мм, прикладывать к ним разность потенциалов до 30 000 в, что соответствует градиенту 10^6 в/см. Подставляя в формулу (20) $d = 0,3$ мм и $U_2 = 3 \cdot 10^4$ в, получаем численное значение

$$\lambda_m = 2 \cdot 3 \cdot 10^{10} \sqrt{\frac{2 \cdot 9 \cdot 10^{-28}}{4,8 \cdot 10^{-10}}} 3 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{U_1}}{3 \cdot 10^4} \cdot \sqrt{300} \approx 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{U_1}; \quad (21)$$

полагая $U_1 = 1000$ в, находим, что длина волны, на которую приходится максимальная интенсивность излучения при этих условиях $\lambda_m = 0,06$ см.

При ускоряющем поле 10 000 в λ_m оказывается равной 0,2 см.

§ 5. Экспериментальные результаты

Лампа для получения электромагнитного излучения по этому принципу осуществлялась следующим образом.

Катод K представлял вольфрамовую спираль в виде тора, помещенную в фокусирующий цилиндр. Электрод A — сетка — плоский диск из тантала или молибдена толщиной 0,3 мм, диаметром 20 мм, с большим числом отверстий $\varnothing 0,5$ —1 мм, закреплялся на молибденовой траверсе, достаточно жесткой для того, чтобы предохранить диск от возможных вибраций. Электрод B — плоский диск из никеля, толщиной 3—5 мм, диаметром 15 мм, укреплялся так же, как и электрод A . Диаметр диска B был взят меньше, чем диаметр A , в целях устранения больших градиентов поля, которые могли образоваться на острых краях дисков. С этой же целью электрод B имел закругленные и тщательно отшлифованные края (рис. 4). Такая форма электродов позволяла создавать между ними необходимые нам большие градиенты потенциала. Электроды A и B укреплялись таким образом, что между ними оставался зазор в 0,3—1 мм. Относительное расположение электродов и общий монтаж всей лампы видны на рис. 4. Между катодом K и электродом A прикладывался ускоряющий потенциал в 1—10 кВ, между A и B — тормозящий потенциал до 30 кВ. Электрод A заземлялся.

Процессы в лампе нам представлялись в следующем виде.

Широкий, приблизительно параллельный, пучок электронов от катода K направлялся к электроду A . Часть его, пройдя через отверстия диафрагмы, попадала в задерживающее поле между A и B , где и происходило торможение электронов.

Согласно выводам, сделанным в § 2, максимальное излучение происходит в направлении, перпендикулярном к направлению торможения электронов, поэтому индикатор располагался именно в этом направлении. Для обнаружения излучения зазор между электродами AB проектировался при помощи кварцевой линзы на вход индикатора.

Предполагая, что большая часть излучения поглощается стенками баллона лампы, мы затем изменили конструкцию баллона. В этой конструкции кварцевая линза сама являлась частью стенки баллона, для чего она вклеивалась в боковой отросток лампы, как это видно на рис. 5.

Кроме того, для того чтобы иметь возможность в случае необходимости быстро менять электроды или расстояние между ними, лампа была сделана разборной. Для этого траверсы, на которых укреплялись электроды A и B впаивались в ножку, непосредственно сваренную с конусом шлифа. Вынимая конус вместе с электродами, можно было легко производить необходимые изменения. Для поддержания высокого вакуума эта лампа не отпаивалась от вакуумной схемы.

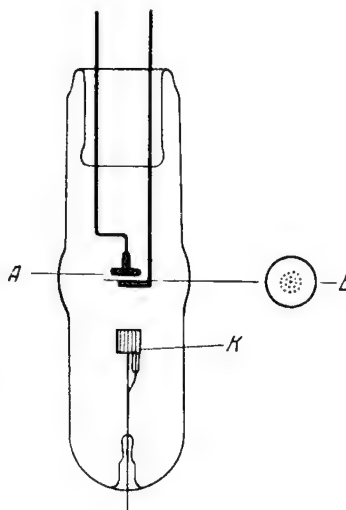


Рис. 4.

Вопрос о подборе индикатора излучения встал перед нами при первых же попытках обнаружить наличие радиации. Для диапазона длин волн $\lambda < 1$ см определенных сведений о технически разработанных конструкциях индикаторов в нашем распоряжении не было. Поэтому в первых опытах был использован обычно употребляемый для обнаружения инфракрасных лучей термозлемент открытого типа в соединении с зеркальным гальванометром; каких-либо определенных сведений о чувствительности, сопротивлении и т. п., характеризующих работу этих термозлементов в этом диапазоне длин волн, не было, и при ориентировочных подсчетах были косвенно использованы сведения о них, имевшиеся в специальной литературе.

В дальнейшем нам представилось возможным построить индикатор — радиометр, для частот интересующего нас диапазона, работа которого основана на принципе газового термометра. Радиометр состоял из герметически закрытой камеры, наполненной газом, в которой помещалось также вещество, поглощающее радиацию.

В одну из стенок камеры была вделана диафрагма. При поглощении радиации веществом, газ, заполняющий камеру, расширялся и давил на мембрану. Деформация диафрагмы измерялась либо по изменению емкости конденсатора, при этом диафрагма являлась

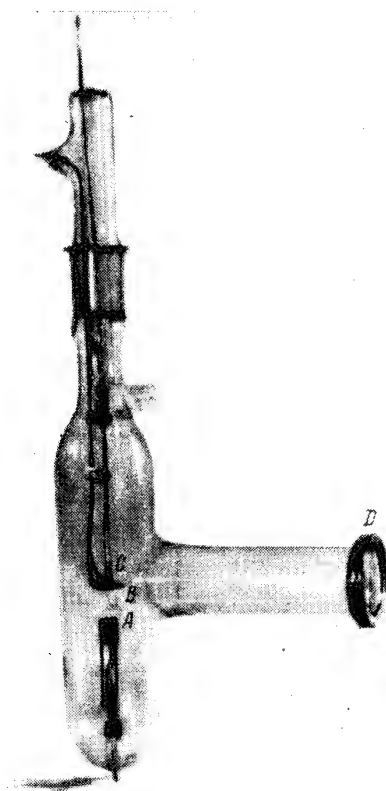


Рис. 5.

одной из его обкладок, либо по смещению интерференционных полос; при этом диафрагма была связана с зеркальцем интерферометра. При помощи такого индикатора нами было обнаружено электромагнитное излучение миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. Максимальная наблюдаемая нами интегральная мощность излучения равнялась 10^{-8} вт.

Заключение

1. Расчет, произведенный на основании теоретических соображений, показывает, что практически возможно получение электромагнитных колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов методом торможения электронов.

2. На основании формул, выведенных для случая конструкции лампы с плоскими электродами, мы приходим к заключению, что для получения наиболее высоких частот оказывается необходимым создание высоких градиентов в вакууме между электродами.

3. При практически возможных градиентах поля 10^6 в/см возможно получение радиации с максимумом интенсивности, приходящимся на длины волн в диапазоне от нескольких сантиметров до 0,5 мм.

Получение этим методом электромагнитного излучения еще более короткой длины волны достаточной интенсивности в лампе с плоской конструкцией электродов требует еще более высоких градиентов тормозящего поля или снижения начальной скорости электронов. Первое ограничивается пробивным напряжением между электродами, второе ведет к снижению интенсивности.

4. Проведенные эксперименты подтвердили возможность получения электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов непосредственно от движущихся электрических зарядов.

5. Значительного увеличения мощности излучения, по нашему мнению можно достигнуть, если заставить электроны проходить несколько раз одно и то же тормозящее поле, прежде чем они попадут на электроды.

Вторым направлением по увеличению мощности излучения от ускоренно движущихся зарядов является вопрос об образовании электронных сгустков с большим числом электронов, которые давали бы когерентное излучение при торможении.

Поступила в мае 1957 г.

Ассистент С. И. МОЛОКОВСКИЙ

**УСЛОВИЯ ФОКУСИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА
В АКСИАЛЬНО СИММЕТРИЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ
ПРИ НЕЭКРАНИРОВАННОЙ ОТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКЕ**

§ 1. Введение

В последние годы для получения мощных электромагнитных колебаний сверхвысоких частот широкое распространение получили лампы с электродинамическим управлением, такие как лампа бегущей волны, лампа обратной волны, прямопролетный клистрон. Получение больших мощностей достигается за счет использования мощных электронных потоков с большой плотностью объемного заряда. Задача фокусировки электронного потока в таких электронных приборах в конечном счете заключается в том, чтобы создать на участке большой протяженности электронный поток приблизительно постоянного сечения. Эта задача в значительной степени осложняется тем обстоятельством, что на движение электронов существенное влияние оказывает поле объемного электронного заряда.

Первоначальная фокусировка (формирование) электронного потока в указанных электронных приборах осуществляется электронно-оптической системой электронной пушки. Дальнейшая фокусировка потока в области пространства, образуемого спиралью или гребенкой (в ЛБВ), системой пролетных труб (в клистроне) осуществляется обычно с помощью магнитного поля (рис. 1).

В этом случае силы поля объемного заряда, приводящие к расфокусировке электронного потока, оказываются скомпенсированными силами, обусловленными магнитным полем.

На практике широко используется способ фокусировки мощных электронных потоков в однородном магнитном поле при экранированном катоде. Магнитное поле в этом случае (применением специальных полюсных наконечников или системы экранов) исключается из области электронной пушки.

Наряду с фокусировкой в однородном поле при экранированной пушке практическое применение получила фокусировка мощных электронных потоков магнитным полем системы соленоидов при неэкранированной от поля пушке [1,2]. Однако в литературе не опубликовано экспериментальных данных относительно этого вида фокусировки потока. Теоретически вопрос фокусировки при неэкранированной пушке затрагивался лишь для некоторых частных случаев: в работе Менделя [3] применительно к случаю параксиальных потоков и в работе Ванга [4], рассматривающей фокусировку потока в однородном магнитном поле.

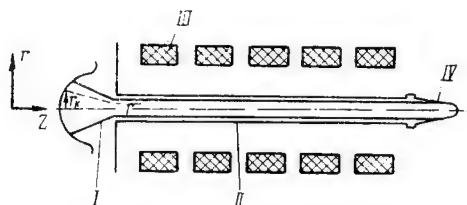


Рис. 1. Схематическое изображение типичной фокусирующей системы клистрона, ЛБВ

I — электронная пушка;
II — область канала, образуемого пролетными трубами (в клистроне), спиралью (в ЛБВ);
III — магнитные фокусирующие соленоиды;
IV — коллектор электронов

Целью настоящей статьи является теоретическое рассмотрение условий фокусировки электронного потока при неэкранированной от магнитного поля пушке в общем случае непараксиальных электронных потоков.

§ 2. Анализ условий фокусировки

Теоретический анализ условий фокусировки электронного потока мы проведем на основании общих уравнений движения электронного потока. Используя уравнения движения в форме Лагранжа и обобщенную функцию Лагранжа для случая совмещенных электрического и магнитного полей, можно получить уравнения движения электрона в полях с аксиальной симметрией в следующей удобной для анализа форме:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = e \frac{\partial U}{\partial r} - 2\alpha \eta e \frac{\Phi - \Phi_k}{r} \left[2\pi B_z - \frac{\Phi - \Phi_k}{r^2} \right], \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = e \frac{\partial U}{\partial z} - 2\alpha \eta e \frac{\Phi - \Phi_k}{r^2} \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2\pi} \eta \frac{\Phi - \Phi_k}{r^2}, \quad (3)$$

где:

r, z, θ — цилиндрические координаты;

$\eta = \frac{e}{m}$ — величина отношения заряда электрона e к массе m ;

α — постоянная величина, равная $\frac{1}{8\pi^2}$;

U — электростатический потенциал, который в дальнейшем мы будем представлять в виде суммы потенциала, создаваемого электродами U_L и потенциала объемного заряда U_p

$$U = U_L + U_p;$$

B_z — аксиальная составляющая магнитного поля в точке местонахождения электрона;

$\Phi = \int_0^r 2\pi B_z r dr$ — магнитный поток, пронизывающий плоскость, перпендикулярную оси z , в которой находится в данный момент электрон (внутри круга с радиусом, равным текущей радиальной координате электрона);

$\Phi_k = \int_0^{r_k} 2\pi B_z r dr$ — магнитный поток, пронизывающий поверхность катода, опирающуюся на окружность с радиусом, равным радиальной координате электрона на катоде r_k .

Используя разложение B_z в ряд по степеням r и производя соответствующие преобразования, можно получить следующее выражение для Φ через значение поля на оси B_{0z} и его производные:

$$\Phi = 2\pi B_{0z} \frac{r^2}{2} - 2\pi B_{0z}'' \frac{r^4}{24} + \dots = 2\pi \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(n!)^2} B_{0z}^{(2n)} \frac{r^{2n+2}}{2^{2n} (2n+2)}. \quad (4)$$

Для дальнейшего рассмотрения будет полезна также следующая форма записи уравнения (1):

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = e \frac{\partial U}{\partial r} - 2\alpha \eta e \left[\frac{\Phi}{r} 2\pi B_z - \frac{\Phi^2 + \Phi_k^2}{r^3} + \frac{\Phi_k}{r^3} (2\Phi - 2\pi B_z r^2) \right]. \quad (1')$$

Анализ приведенных выше уравнений позволяет рассмотреть ряд особенностей фокусировки электронов в аксиально-симметричном поле при незранированном катоде.

1. Как следует из уравнения (1), действующая на электрон радиальная сила, обусловленная магнитным полем, в общем случае зависит не только от величины магнитной индукции B_z в рассматриваемой точке, но и от разности потоков поля: потока в данной плоскости — Φ и потока поля через катод Φ_k . Таким образом, радиальная сила, действующая на электрон в данной точке $M(r, z)$, существенным образом зависит от величины магнитного поля в области катода.

При неизменной напряженности магнитного поля в данной точке радиальная сила будет уменьшаться при стремлении разности потоков $\Phi - \Phi_k$ к нулю и при $\Phi = \Phi_k$ обратится в нуль.

Очевидно, что для создания радиальной силы конечной величины, при исчезающе малых значениях $\Phi - \Phi_k$, требуются очень большие величины индукции поля B_z . Отсюда, в частности, следует, что для получения параллельного электронного потока с помощью однородного поля, начинающегося на катоде, требуются очень большие величины напряженности магнитного поля. Действительно, условие получения параллельного потока может быть записано в виде $r \simeq r_k = \text{const}$, отсюда для случая однородного поля с неизбежностью следует: $\Phi \simeq \Phi_k$; таким образом, B_z в пределе должна стремиться к бесконечности.

Используя уравнение (1'), легко обычным способом нахождения экстремума определить условие максимума радиальной силы в зависимости от величины Φ_k . Это условие имеет вид:

$$\Phi_k = \Phi - \pi B_z r^2. \quad (5)$$

Во многих практических случаях обычно выполняется

$$\Phi \simeq \pi r^2 B_z \quad (6)$$

и условие максимума силы записывается в виде $\Phi_k = 0$, что соответствует экранированному от поля катоду *).

2. В общем случае величина радиальной силы, обусловленной магнитным полем, зависит от взаимного направления потоков поля в данной точке и на катоде. Действительно, обращаясь к уравнению (1') мы видим, что знак члена

$$\frac{\Phi_k}{r^3} (2\Phi - 2\pi B_z r^2),$$

входящего в выражение для магнитной силы, зависит от знаков Φ_k и Φ и, следовательно, величина силы будет зависеть от взаимного направления Φ и Φ_k .

При одинаковом направлении Φ и Φ_k **) радиальная сила будет зависеть только от абсолютных значений Φ , Φ_k и B_z , и в уравнениях (1) и (1') следует рассматривать Φ , Φ_k и B_z как абсолютные величины.

В тех случаях, когда имеет место равенство

$$\Phi - \pi B_z r^2 \simeq 0,$$

*) Условие максимума радиальной силы, заключающееся в равенстве нулю напряженности магнитного поля на катоде, для случая движения электрона в однородном поле получено другими методами в работе Ванга. Здесь это условие вытекает из выражения (5) как частный случай.

**) Здесь и в дальнейшем предполагается, что в любом сечении потока поле сохраняет по сечению постоянное направление, т. е. B_z и Φ имеют одинаковый знак.

из уравнения (1') с очевидностью следует, что величина радиальной силы также зависит только от абсолютных значений поля в рассматриваемой плоскости и поля в области катода*). В уравнениях (1) и (1') следует тогда также рассматривать Φ , Φ_k и B_z как абсолютные величины.

3. Как следует из уравнения (1'), в зависимости от соотношения B_z , Φ и Φ_k действие магнитного поля может быть как фокусирующим (член в квадратных скобках уравнения (1') — положительная величина, и радиальная сила направлена к оси), так и расфокусирующим (член в квадратных скобках — отрицательная величина и сила направлена от оси системы). В частности, для областей, где $\Phi \rightarrow 0$ при $\Phi_k \neq 0$ действие радиальной силы, обусловленной наличием магнитного поля в области электронного потока (в данном случае в области катода), будет расфокусирующей.

Случай $\Phi \rightarrow 0$, $\Phi_k \neq 0$, когда радиальная сила направлена от центра, может иметь практическое значение для рассеяния электронов в области коллектора с целью равномерного распределения приносимой ими мощности по его поверхности.

При экранированном от поля катоде ($\Phi_k = 0$) радиальная сила, обусловленная магнитным полем, будет фокусирующей в тех точках пространства, где выполняется равенство:

$$2\pi |B_z| > \frac{|\Phi|}{r^2}. \quad (7)$$

В тех точках, где

$$2\pi |B_z| < \frac{|\Phi|}{r^2},$$

радиальная сила направлена от центра.

Там, где

$$2\pi |B_z| = \frac{|\Phi|}{r^2},$$

радиальная сила равна нулю.

Из равенства (7) вытекает, что в области однородного поля радиальная сила всегда направлена к оси системы.

В тех случаях, когда поле на катоде совпадает по направлению с полем в данной точке, или когда в рассматриваемой плоскости выполняется соотношение

$$\Phi - \pi B_z r^2 \simeq 0,$$

*) Отсюда, в частности, следует, что в электронно-оптической системе, использующей серию коротких магнитных линз с периодически чередующимся направлением поля (система «периодической фокусировки»), при неэкранированном от поля катоде, для случая параксиальных пучков имеет место постоянство радиальной силы в линзах с различным направлением поля. Для непараксиальных пучков магнитная сила в линзах с различными направлениями поля будет иметь различную величину.

условие фокусирующего действия поля запишется в виде:

$$|\Phi| - |\Phi_k| > 0; \quad 2\pi|B_z| \geq \frac{\Phi}{r^2}. \quad (8)$$

Радиальная сила будет направлена от оси и действие будет расфокусирующим, если:

$$|\Phi| - |\Phi_k| < 0. \quad (9)$$

Таким образом, необходимое условие фокусирующего действия силы, обусловленной магнитным полем, записывается в этих случаях в виде:

$$|\Phi| - |\Phi_k| > 0. \quad (10)$$

Это условие можно физически интерпретировать следующим образом:

Если электрон находится внутри трубки постоянного магнитного потока Φ_k , радиальная сила будет расфокусирующей, если электрон находится вне этой трубки, то радиальная сила (при $2\pi B_z \geq \frac{\Phi}{r^2}$) будет фокусирующей. Если учесть, что границы трубок постоянного потока совпадают с силовыми линиями магнитного поля, то сказанное выше становится особенно наглядным и может быть использовано при качественной оценке фокусирующих свойств поля.

4. Из уравнения (2) вытекает, что при движении электрона в неоднородном поле его осевая скорость \dot{z} будет меняться. Под действием сил магнитного поля электрон может или ускоряться, или замедляться. Так, например, при $\Phi_k = 0$ в нарастающем в направлении оси z поле электрон тормозится, в убывающем — ускоряется.

При движении электрона в однородном поле $\frac{\partial \Phi}{\partial z} \equiv 0$, и осевая скорость электрона сохраняется постоянной (если, конечно, одновременно $\frac{\partial U}{\partial z} = 0$).

5. Угловая скорость электронов при движении в аксиально-симметричных магнитном и электрическом полях определяется разностью магнитных потоков $\Phi - \Phi_k$ (3). Угловая скорость меняет знак при одновременном изменении направления поля в данной точке и поля на катоде. При движении электронного потока в однородном поле при экранированном катоде ($\Phi_k = 0$) угловая скорость электронов постоянна для всех электронов и не зависит от радиальной координаты.

Дальнейший анализ проведем путем рассмотрения уравнения траектории электронов. Исключая из уравнений движения время, можно получить уравнение траектории в следующем виде:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \varphi_1(U, \Phi) \left(\frac{dr}{dz} \right)^3 - \varphi_2(U, \Phi) \left(\frac{dr}{dz} \right)^2 + \varphi_1(U, \Phi) \frac{dr}{dz} = \varphi_2(U, \Phi), \quad (11)$$

где функции $\varphi_1(U, \Phi)$ и $\varphi_2(U, \Phi)$ определяются выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{\eta \frac{\partial U}{\partial z} - 2\alpha\eta^2 \frac{\Phi - \Phi_k}{r^2} \frac{\partial \Phi}{\partial z}}{2\eta U - \left(\frac{1}{2\pi}\eta\right)^2 \left(\frac{\Phi - \Phi_k}{r}\right)^2}; \\ \varphi_2 &= \frac{\eta \frac{\partial U}{\partial r} - 2\alpha\eta^2 \frac{\Phi - \Phi_k}{r} \left[2\pi B_z - \frac{\Phi - \Phi_k}{r^2}\right]}{2\eta U - \left(\frac{1}{2\pi}\eta\right)^2 \left(\frac{\Phi - \Phi_k}{r}\right)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Уравнение (11) является уравнением траектории электрона в аксиально-симметричном магнитном поле, записанном в общем виде.

Для случая параксиальных потоков, опуская в нем члены, содержащие вторую и высшие степени $\frac{dr}{dz}$ и r , получим уравнение траектории параксиальных электронов [5]

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{1}{2U} \frac{dU}{dz} \frac{dr}{dz} + \frac{1}{4U} \frac{d^2 U}{dz^2} r + \frac{\eta}{8U} \left(B_{oz}^2 - \frac{r_k^4}{r^4} B_{ozk}^2 \right) r - \frac{1}{U} \frac{\pi \rho}{\varepsilon} r = 0$$

здесь

ρ — абсолютная величина плотности объемного заряда;

ε — диэлектрическая проницаемость;

B_{ozk} — индукция магнитного поля в плоскости катода.

§ 3. Общее условие получения параллельного электронного потока

Полагая в уравнении (11) $\frac{dr}{dz} = 0$, находим, что

$$\eta \frac{\partial U}{\partial r} = 2\alpha\eta^2 \frac{\Phi - \Phi_k}{r} \left[2\pi B_z - \frac{\Phi - \Phi_k}{r^2} \right]. \quad (13)$$

С другой стороны, очевидно, что электрическое поле, реализующееся в некоторой системе электродов при наличии объемного заряда, определяется уравнением Пуассона

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 4\pi \frac{\rho(r, z)}{\varepsilon}. \quad (14)$$

Определяя величину радиального электрического поля из уравнения (14),

$$\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{4\pi}{\varepsilon} \frac{1}{r} \int_0^r \rho(r, z) r dr - \frac{1}{r} \int_0^r \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} r dr, \quad (15)$$

и подставляя в выражение (13), получаем следующее уравнение для нахождения магнитного поля, обеспечивающего получение параллельного электронного потока

$$2\alpha\eta \frac{\Phi - \Phi_k}{r} \left[2\pi B_z - \frac{\Phi - \Phi_k}{r^2} \right] = \frac{4\pi}{\varepsilon} \frac{1}{r} \int_0^r \rho(r, z) r dr - \frac{1}{r} \int_0^r \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} r dr \quad (16)$$

или, выражая плотность объемного заряда через осевую слагающую плотности тока J_z и скорости v_z , будем иметь:

$$2\alpha\eta \frac{\Phi - \Phi_k}{r} \left[2\pi B_z - \frac{\Phi - \Phi_k}{r^2} \right] = \frac{1}{r} \frac{4\pi}{\varepsilon} \int_0^r \frac{J_z}{v_z} r dr - \frac{1}{r} \int_0^r \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} r dr \quad (17)$$

Следует иметь в виду, что величины $\rho(r, z)$, $V(r, z)$, $U(r, z)$, входящие в правые части уравнений (16) и (17), в свою очередь, зависят от распределения магнитного поля, поэтому при решении этих уравнений следует применить метод последовательных приближений.

В качестве нулевого приближения во многих практических случаях можно принять

$$U \approx U_L; \quad v_z \approx \sqrt{2 \frac{e}{m} U_L}.$$

Рассмотрим в качестве примера случай электронного потока, распространяющегося в свободном от внешних электростатических полей пространстве и имеющего на входе в рассматриваемую область постоянную по сечению плотность тока $J_z(r) = \text{const}$. Ограничиваясь нулевым приближением, для которого

$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\partial U_L}{\partial z} = 0$, $U_z = \text{const}$, (17) получаем:

$$2\alpha\eta \frac{\Phi - \Phi_k}{r} \left[2\pi B_z - \frac{\Phi - \Phi_k}{r^2} \right] = \frac{4\pi}{2\varepsilon} \frac{J_z}{v_z} r. \quad (18)$$

Нетрудно видеть, что равенство (18) будет строго выполняться во всех точках области, где предполагается параллельное движение потока, если имеют место следующие условия:

а) в рассматриваемой области поле однородно $B_z(z) = \text{const}$ и, следовательно,

$$\Phi = \pi r^2 B_z; \quad (19)$$

б) на входе в рассматриваемую область равновесного параллельного движения потока имеет место соотношение:

$$r = \frac{r_k}{C}, \quad (20)$$

т. е. радиальные координаты электронов на входе в эту область пропорциональны их координатам на катоде;

$$\text{в)} \quad \Phi_k \approx \pi r_k^2 B_{ozk}, \quad (21)$$

что с достаточной степенью точности будет выполняться для тонких потоков.

С учетом равенств (19), (20), (21) из уравнения (18) можно определить требуемую величину индукции однородного поля

$$B_z = \frac{1}{\left[1 - C^4 \frac{B_{ozk}^2}{B_z^2}\right]^{1/2}} \left(\frac{J_z}{v_z \pi \varepsilon \eta^2}\right)^{1/2} * \quad (22)$$

Очевидно, что с определенной степенью приближения эта формула может быть использована и в тех случаях, когда условия (20) и (21) выполняются лишь приближенно.

§ 4. Условие получения в магнитном поле равномерно сходящегося электронного потока $\frac{dr}{dz} = \text{const}$

Ограничиваясь малыми углами схождения $\frac{dr}{dz} \ll 1$, из уравнения траекторий найдем, что условие получения сходящегося потока будет иметь вид:

$$\frac{\eta \frac{\partial U}{\partial r} - 2\alpha \eta^2 \frac{\Phi - \Phi_k}{r} \left[2\pi B_z - \frac{\Phi - \Phi_k}{r^2} \right]}{\eta \frac{\partial U}{\partial z} - 2\alpha \eta^2 \frac{\Phi - \Phi_k}{r^2} \frac{\partial \Phi}{\partial z}} = \frac{dr}{dz} = \text{const}. \quad (23)$$

Используя соотношение (23), определим в качестве примера характер и величину магнитного поля, необходимого для формирования тонкого длинного сходящегося электронного потока, распространяющегося в свободном от внешних электростатических полей пространстве, при экранированном от магнитного поля катоде. С учетом принятых ограничений, полагая

$$\frac{dU}{dz} \approx 0; \quad v_z \approx \sqrt{2 \frac{e}{m} U_L}$$

и пренебрегая членами порядка r^2 , из соотношений (15) и (23) найдем:

$$\frac{1}{r} \frac{4\pi}{\varepsilon} \int_0^r \frac{J_z r dr}{\sqrt{2 \frac{e}{m} U_L e}} = 2\alpha \eta^2 r B_z^2. \quad (24)$$

Для случая потока с постоянной плотностью тока по сечению из (24) будем иметь:

$$\frac{4\pi}{2\varepsilon} \frac{J_z}{\sqrt{2 \frac{e}{m} U_L}} = 2\alpha \eta^2 B_z^2. \quad (25)$$

*) Отметим, что эта формула совпадает с выражением, полученным в упомянутой выше работе Менделя в результате анализа движения параксимального потока.

Если определить плотность тока с помощью соотношения

$$J_z = \frac{I}{\pi R^2},$$

в котором:

I — электронный ток,

R — текущий радиус электронного потока,

и выразить текущий радиус потока R_z через радиус потока на входе в рассматриваемую область $R(z_0) = R_0$:

$$R = R_0 - \frac{dr}{dz}(z - z_0),$$

то формула (25) может быть преобразована к виду:

$$B_z = \frac{1}{R_0 - \frac{dr}{dz}(z - z_0)} \left(\frac{I}{\sqrt{2 \frac{e}{m} U_L \pi \varepsilon \eta \alpha}} \right)^{1/2}. \quad (26)$$

Интересно отметить, что величина магнитной индукции в каждом отдельном сечении потока связана с величиной плотности объемного заряда формулой, аналогичной формуле для параллельного потока (см., например, выражение (22) при $B_{ozk} = 0$). Однако, в отличие от случая параллельного потока, величина индукции здесь меняется от точки к точке вдоль оси z , нарастая в направлении распространения потока. Используя полученные выше результаты, обсудим характер магнитного поля, которое может обеспечить фокусировку электронного потока в системе электродов, представленной на рис. 1.

Первоначальное формирование потока обеспечивается электронной пушкой, создающей определенную степень сжатия потока. Дальнейшая фокусировка потока в области канала должна осуществляться с помощью магнитного поля.

Как показано в § 3, параллельное движение электронного потока может быть обеспечено с помощью однородного магнитного поля. Если даже и не ограничивать себя условиями строго равновесного движения, как это сделано в § 3, то и в этом случае можно показать, что фокусировка потока в области канала может быть достигнута с помощью однородного или близкого к однородному поля. В зоне канала, примыкающей к электронной пушке, и в области самой пушки магнитное поле должно, очевидно, постепенно уменьшаться и достигать на катоде такой достаточно малой величины, при которой в области канала магнитные силы имели бы необходимое фокусирующее действие. [См. § 2, выражение (10)]. В частном случае магнитное поле может принимать на катоде нулевое значение. Можно также представить себе случай, когда в плоскости катода поле небольшой величины будет направлено противоположно полю в однородной области (отрицательное поле на катоде).

Применительно к практическому осуществлению такой фокусирующей системы следует отметить следующее. На основании изло-

женного выше существенное влияние на движение электронов в области канала будет оказывать величина и конфигурации магнитного поля в области электронной пушки. Таким образом, регулируя магнитное поле в области пушки, оказывается возможным в широких пределах изменять условия фокусировки и, следовательно, подбирать их оптимальными.

В том случае, когда электронная пушка не обеспечивает требуемого сжатия потока, дополнительное сжатие может быть осуществлено с помощью магнитного поля, которое в этом случае должно быстро нарастать уже в области самой пушки.

§ 5. Вопрос моделирования фокусирующей системы

Рассмотрим представляющий практический интерес вопрос моделирования фокусирующих систем для мощных электронных потоков при учете полей объемного заряда.

Метод моделирования широко используется в электронной оптике. Возможность моделирования (моделирования режима и масштабного моделирования) для систем, в которых можно пренебречь полями объемного заряда, доказывается обычно путем анализа уравнения траектории параксиальных электронов [6]. Однако получаемые таким образом условия моделирования не являются, вообще говоря, очевидными для систем с большим значением электронного объемного заряда, так как в этом случае в рассмотрение должны быть включены поля объемного заряда, а их подобие при моделировании само требует предварительного доказательства.

Докажем, что известные условия моделирования сохранятся и при наличии в моделируемой электронно-оптической системе движущегося электронного объемного заряда. Для этого воспользуемся методом последовательных приближений и для общности проведем доказательство с помощью уравнения траектории (11).

Пусть потенциал на электродах фокусирующей системы изменился в n раз, а напряженность магнитного поля в \sqrt{n} раз. Тогда, полагая в нулевом приближении плотность объемного заряда равной нулю, из уравнения (11) получаем, что траектории электронов в нулевом приближении останутся неизменными. *) Если предположить, что на основании нулевого приближения в том и другом случае рассчитана плотность объемного заряда, то, с учетом подобия картин поля в неизменности траекторий в нулевом приближении, следует считать, что распределение плотности объемного заряда в обоих случаях (до и после изменения электрического и магнитного полей) будет одинаково. Величина же плотности объемного заряда изменится в n раз. Действительно, величина электрического поля

*) Значение коэффициентов при производных в уравнении (11) и член в правой части при замене U на nU и B_z на $B_z\sqrt{n}$ сохраняется неизменным и, следовательно, уравнения траектории до и после изменения режима будут тождественными.

у катода, создаваемая за счет потенциалов на электродах, при изменении этих потенциалов в n раз изменится в n раз. Поле объемного заряда у катода в силу соотношения $\text{grad } U_p = -\text{grad } U_L = 0$, которое имеет место у катода в режиме ограничения тока объемным зарядом,*) при этом изменится также в n раз. С учетом этого обстоятельства и принимая во внимание одинаковость распределения плотности объемного заряда в том и другом случае, мы должны заключить, что величина плотности заряда будет отличаться в n раз.

В соответствии с этим картина распределения потенциала, рассчитанная с учетом объемного заряда (первое приближение), будет в обоих случаях аналогична, при этом отношение потенциалов в любой точке пространства сохранится равным n . Следовательно, траектории электронов, определенные в первом приближении, останутся неизменными.

Можно доказать, что неизменность траектории сохранится и для любого k приближения, при котором траектории электронов будут бесконечно близки к истинным.

Таким образом, следует считать, что и при наличии движущегося объемного заряда траектории электронов останутся неизменными при одновременном изменении потенциалов на электродах в n раз и напряженности магнитного поля в \sqrt{n} раз.

Используя аналогичный прием, с помощью уравнения (11) можно показать, что условия подобия траектории при масштабном моделировании сохраняют силу и при наличии объемного заряда.

Полученные таким образом выводы могут служить материалом для моделирования по напряжению и масштабного моделирования фокусирующих систем при больших величинах пространственного заряда.

Заключение

В статье рассмотрены условия фокусировки электронного потока в аксиально-симметричном магнитном поле при неэкранированной от поля электронной пушке в общем случае непараксиальных потоков при произвольном распределении поля по оси потока. Для анализа применена специальная форма уравнений движения. Анализ уравнений движения, записанных в такой форме, позволяет последовательно проследить ряд особенностей фокусировки потока при неэкранированной от магнитного поля пушке. Из этих уравнений непосредственно вытекает зависимость величин фокусирующих сил магнитного поля как от напряженности магнитного поля в рассматриваемой точке, так и от напряженности магнитного поля в области катода.

Установлено, что в общем случае величина радиальных сил, обусловленных магнитным полем, зависит от взаимного направления поля в рассматриваемой точке и в области катода. В случае парак-

*) Здесь мы пренебрегаем влиянием начальных скоростей электронов.

сиальных электронов радиальная сила зависит только от абсолютных значений: поля в рассматриваемой точке и поля на катоде. Этот вывод может иметь существенное значение для систем периодической фокусировки электронного потока.

Приведенный анализ показывает, что в отдельных случаях действие магнитного поля может быть как фокусирующим, так и расфокусирующим.

Для большинства практических случаев необходимое условие фокусирующего действия сил поля записывается в виде

$$|\Phi| > |\Phi_k|.$$

Получено условие максимального фокусирующего действия магнитного поля в общем случае при произвольном распределении магнитного поля по оси потока.

Путем анализа непараксиального уравнения траектории рассмотрены условия получения в магнитном поле параллельного и сходящегося потоков.

На основании анализа общего уравнения траектории электрона в аксиально-симметричном электрическом и магнитном поле кратко рассмотрен вопрос моделирования (масштабного и по напряжению) фокусирующих систем, при учете полей объемного электронного заряда.

Приведенный анализ ограничивается случаем нерелятивистских скоростей и не рассматривает влияния на фокусировку потока высокочастотных полей, которые могут иметь место в динамическом режиме работы электронного прибора. И тот и другой вопрос выходят за рамки данной статьи и должны стать предметом специального исследования.

Следует отметить, что приведенные здесь теоретические выводы находятся в согласии с экспериментальными данными, полученными при разработке и исследовании фокусирующих систем для мощных электронных потоков в лаборатории РТЭ ЛЭТИ.

В заключение автор выражает свою признательность д. т. н. профессору К. И. Крылову за сделанные им замечания и указания по существу изложенных вопросов.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Chodorow, E. Ginston, I. Nielson S. Sonkin, Design and Performance of high power pulsed Klystron, PIRE, № 11, 1953.
2. A. E. Rankin, High power UHF klystron application, Conv. record of IRE, Part 2, 1953.
3. J. T. Meniel, Magnetic Focusing of Electron Beams, PIRE, № 3, 1955.
4. C. C. Wang, Electron beams in axially symmetrical electric and magnetic fields, PIRE, № 2, 1950.
5. Дж. Р. Пирс, Теория и расчет электронных пучков, Изд. „Советское радио“, 1956
6. А. Рустерхольц, Электронная оптика, Изд. иностранной литературы, 1952.

Поступила в мае 1957 г.

Инж. Е. Д. ПИГУЛЕВСКИЙ

СТРУКТУРА ПОЛЯ ПЬЕЗОИЗЛУЧАТЕЛЯ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ МИКРОСКОПЕ

Применяемые в ультразвуковой микроскопии излучатели продольных упругих волн, как правило, имеют высокое значение отношения размеров излучающей поверхности к длине излучаемой волны ($kr = \frac{2\pi r}{\lambda} \gg 100$, где r — радиус излучателя) и поэтому в первом приближении являются источниками плоских волн. Такое приближение, однако, не объясняет многих явлений, происходящих в ультразвуковом микроскопе. Реальное поле излучателя всегда имеет фронт волны, отличный от плоского, и обладает сложной структурой поперечного сечения волн.

Сложная структура поля излучателя, накладываясь на изображение объекта, может в ряде случаев сильно исказить его.

В ультразвуковом микроскопе существуют две основные причины отличия фронта волны от фронта плоской волны.

Во-первых, наряду с основными колебаниями по толщине, в пьезоэлектрических излучателях через упругие связи возбуждаются и другие колебания, которые усложняют конфигурацию колеблющейся грани излучателя. В работе [1] указывается, что основную роль в искажении поршневых колебаний играют, очевидно, изгибные колебания. Естественно, что эти колебания участвуют и в построении поля в ультразвуковом микроскопе, так как именно изгибные колебания имеют компоненты смещений, нормальные к поверхности излучателя и, следовательно, передающиеся в жидкость.

В общем случае анизотропной пластинки уравнение изгибных колебаний имеет вид:

$$\rho h \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = L\xi, \quad (1)$$

где:

ρ — плотность пластинки,

h — толщина пластинки,

L — оператор анизотропного изгиба.

Точное решение этого уравнения даже в случае слабой анизотропии представляет большие трудности, поэтому мы ограничимся рассмотрением изотропного случая, что дает строгое решение для изотропной керамики титаната бария. В случае же кварцевых излучателей, где анизотропией, строго говоря, пренебречь нельзя, мы качественно объясним влияние анизотропии, опираясь на опыт.

В изотропном случае решение уравнения изгиба может быть легко получено из

$$\rho h \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{Eh^3}{12(1-\sigma^2)} \Delta^2 \xi, \quad (2)$$

где:

E — модуль Юнга,

σ — коэффициент Пуассона.

Ищем решение в виде стоячей волны

$$\xi = \xi_0(x, y) \exp(-i\omega t). \quad (3)$$

Мы, очевидно, не допустим большой ошибки, если при большом числе узловых линий примем граничные условия, соответствующие опорным краям пластинки. Действительно, такие условия фактически будут в ближайших к краям узловых линиях, так как в них запрещено смещение, но не запрещен поворот.

Таким образом, для прямоугольной пластинки со сторонами a и b , граничные условия запишутся:

$$\left. \begin{array}{l} \xi = 0 \\ \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = 0 \end{array} \right\} \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} x = 0 \\ x = a \end{array} \right. \quad \text{и} \quad \left. \begin{array}{l} \xi = 0 \\ \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} = 0 \end{array} \right\} \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} y = 0 \\ y = b \end{array} \right. \quad (4)$$

Используя (4) и (3), можно найти решение (2) в виде:

$$\xi_0(x, y) = C \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}. \quad (5)$$

где: m и n — число узловых линий соответственно a и b , причем допустимые частоты будут

$$\omega_{mn} = \frac{h\pi^2}{2\sqrt{3}} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)} \left[\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right]} \quad (6)$$

или для квадратной пластинки ($a = b$; $m = n$)

$$f_n = \frac{n^2 \pi h}{2\sqrt{3}a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}}. \quad (7)$$

Не повторяя вывода для круглой пластинки, заимствуем формулу, связывающую число узловых окружностей с соответствующей ей частотой из работы [2]

$$f_n = \frac{n^2 \pi h}{\sqrt{3}a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \quad (8)$$

Выведенные формулы справедливы только для колебаний чистого изгиба, т. е. когда $\lambda_{изг} \gg h$, но, как показал опыт, они хорошо объясняют конфигурацию колеблющейся грани излучателя.

Опыт проводился на ультразвуковом микроскопе системы С. Я. Соколова с преобразованием на поверхности жидкости [3]. Микроскоп устанавливался на специальном столике с тремя регулировочными винтами, что позволяло установить строго параллельно плоскости излучателя и преобразователя и, тем самым, избавиться от влияния интерференционных полос, вызываемых комбинационными

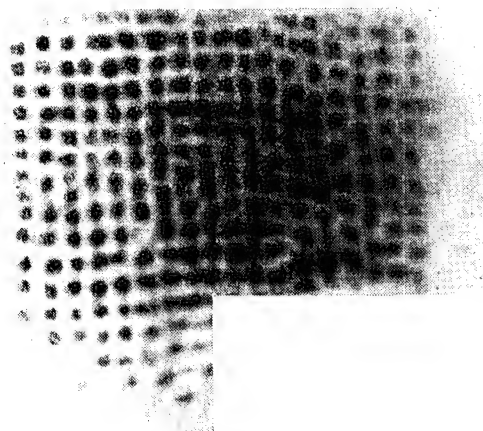


Рис. 1. Структура поля в непосредственной близости от пьезокварцевой пластинки размером 25×25 мм, $f = 2,7$ МГц

стоячими волнами. Реакция среды при больших значениях kr практически однородна и не влияла на результаты опыта. Частота измерялась резонансными волномерами КВ-5 и ДВ-2.

На рис (1, 2, 3) приведены образцы полученных конфигураций поля в непосредственной близости от излучателя (1—2 мм). Расчеты по формулам (7) и (8) дают хорошее совпадение опытных данных с теорией. Однако попытка произвести расчет для круглой кварцевой пластинки по формуле (8) привела к большому расхождению — примерно в 2 раза. Можно предположить, что это следствие анизотропии упругих свойств кварцевой пластинки в ее плоскости, которая, как это видно из рис. 3, приводит к появлению узловых радиусов. Правда, эти узловые радиусы выражены очень нечетко, вероятно потому, что упругие свойства меняются весьма плавно по азимуту в плоскости пластинки.

Если считать число этих узловых диаметров по краю пластинки и использовать формулу (8), в которой под n разумеется сумма числа узлов по диаметрам и по кругам, то мы и в случае кварцевой пластинки получим близкое совпадение.

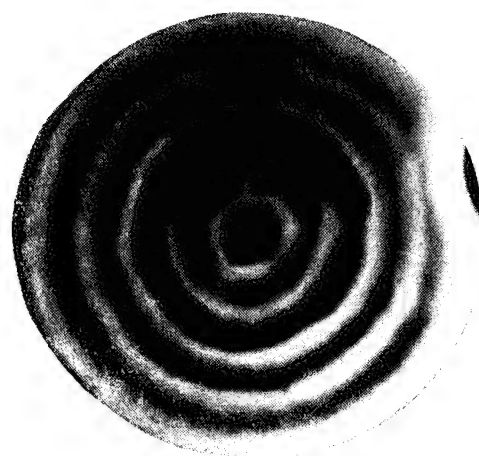


Рис. 2. Структура поля в непосредственной близости от пьезокерамической пластинки $\varnothing 10 \text{ мм}$, $f = 2,5 \text{ мГц}$



Рис. 3. Структура поля в непосредственной близости от пьезокварцевой пластинки $\varnothing 50 \text{ мм}$, $f = 3,0 \text{ мГц}$

По мере удаления излучателя от плоскости преобразователя структура поля изгибных колебаний становится все менее резкой и примерно на расстоянии 1—2 диаметров излучателя влиянием ее можно пренебречь. Но примерно с этого же расстояния становится заметной интерференционная структура поля излучателя, вызванная конечностью размеров излучателя. Благодаря этому, даже при чисто поршневых колебаниях излучается не плоская волна, и результирующее поле может быть получено суперпозицией элементарных сферических волн. Интерференция этих элементарных волн приводит к тому, что, во-первых, начиная с некоторого расстояния, называемого критическим,

$$z_{kp} \simeq 1,5 \frac{r^2}{\lambda}, \quad (9)$$

ограниченный вначале цилиндром с радиусом r , пучок начинает расходиться. Во-вторых, внутри z_{kp} цилиндрический пучок неоднороден по сечению.

Исходной формулой для решения этой задачи является формула Релея:

$$\varphi(r) = -\frac{1}{2\pi} \frac{\partial}{\partial n} \int_S \varphi_0 \frac{\exp(-ikr)}{r} dS, \quad (10)$$

где:

φ_0 — потенциал поверхности излучателя,
 n — нормаль к поверхности S излучателя.

Эта формула допускает непосредственное интегрирование в двух случаях: 1) для осевых точек круглого излучателя, 2) для точек в дальней зоне, т. е. при $z \gg z_{kp}$, и приводит к общеизвестным решениям. В случае же ультразвукового микроскопа нас практически всегда интересует именно область $z \leq z_{kp}$. При $kr \leq 5$ можно получить приближенное решение (10) в виде ряда [4], который, однако, сходится при больших значениях kr (в нашем случае) очень медленно и практически не позволяет получить численные значения.

Вероятно, единственным методом решения задачи при интересующих нас значениях kr является метод, вытекающий из дифракционных представлений Юнга [5], [6]. Потенциал поля при этом определяется как суперпозиция плоской волны и волны „возмущения“, которая и определяет неоднородность волнового пучка. Опуская подробности вывода, приведем лишь основные формулы. В полярных координатах (ρ, Θ, z) , где z совпадает с осью круглой пластинки, а ρ и Θ отсчитываются в ее плоскости, (10) запишется для аксиально-симметричного поля

$$\varphi(\rho, z) = \frac{v_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{t_1} \frac{\exp(-ik\sqrt{z^2+t^2})}{\sqrt{z^2+t^2}} t dt d\Theta, \quad (11)$$

где:

$$v_0 = \frac{\partial \varphi_0}{\partial z},$$

$$t_1 = \rho \cos \Theta + (r^2 - \rho^2 \sin^2 \Theta)^{1/2},$$

Интегрируя (11) по t и выделяя $\varphi_{возм}(\rho, z)$, получим

$$\varphi_{возм} = -\frac{v_0}{2\pi i k} \int_0^{2\pi} \exp(-ik\sqrt{z^2 + t_1^2}) d\Theta. \quad (12)$$

Используя выражение для t_1 , можно разложить показатель экспоненты в ряд по степеням отношения $b = \rho/r$. В зависимости от наименьшей степени, которую мы оставим в полученном ряду, отбросив все высшие степени, получим решение нулевого, первого, второго и т. д. приближения. При этом оказывается, что при заданной погрешности увеличение порядка приближения позволяет вычислять потенциал в точках, более близких к излучателю и более дальних от оси. Количественно погрешность решения при данном приближении и для заданной области поля можно оценить исходя из того, что, во-первых, показатель экспоненты есть ничто иное как фаза элементарной волны и, во-вторых, что относительная погрешность суммы (интеграла) не больше самой большой погрешности каждого слагаемого. Поэтому, если первый отброшенный член ряда есть R , а относительная погрешность в процентах — n , то

$$|R| \leq 2\pi n. \quad (13)$$

В нашем случае мы ограничились вторым приближением, что дает

$$\frac{kr^2}{2z_a} b^3 \leq 2\pi n \quad (14)$$

или, пользуясь для удобства понятием z_{kp} :

$$b^3 z_{kp}/z_a \leq n. \quad (15)$$

На рис. 4 представлены две кривые, дающие область существования решения второго приближения для $n = 10\%$ и $n = 5\%$.

После разложения экспоненты, стоящей под интегралом (12), в ряд и преобразования подинтегрального выражения по формуле Пуассона:

$$J_n(x) = \frac{(x/2)^n}{\sqrt{\pi} \Gamma(n + 1/2)} \int_0^\pi \cos(x \cos \Theta) \sin^{2n} \Theta d\Theta, \quad (16)$$

где: $J_n(x)$ — Бесселева функция первого рода порядка n , получим окончательное выражение $\varphi_{возм}$ во втором приближении:

$$\begin{aligned} \varphi_{возм} \sim \exp\left(-i \frac{kr^2 b^2}{2z_a}\right) & \left[J_0\left(4 \frac{z_{kp}}{z_a} b\right) - \frac{3}{2} b^2 J_2\left(4 \frac{z_{kp}}{z_a} b\right) + \right. \\ & \left. + i b J_1\left(4 \frac{z_{kp}}{z_a} b\right) + \dots \right], \end{aligned} \quad (17)$$

где:

$$z_a = (z^2 + r^2)^{1/2}$$

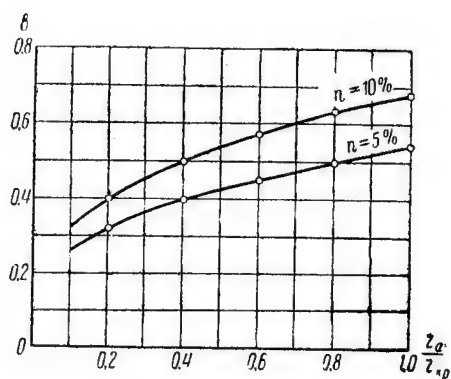


Рис. 4. Графики функций $b = f\left(\frac{z_a}{z_{kp}}\right)$ для двух значений относительной погрешности, полученные для решения второго приближения

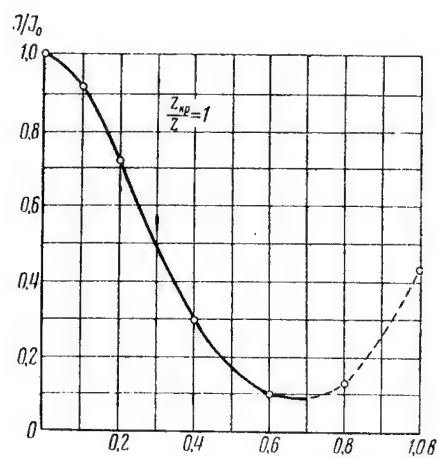


Рис. 5. Теоретическая кривая структуры интерференционного поля поршневого излучателя, $\frac{z_{kp}}{z_a} = 1$

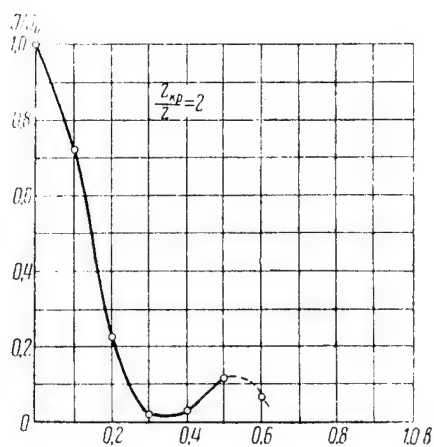


Рис. 6. Теоретическая кривая структуры интерференционного поля поршневого излучателя, $\frac{z_{kp}}{z_0} = 2$

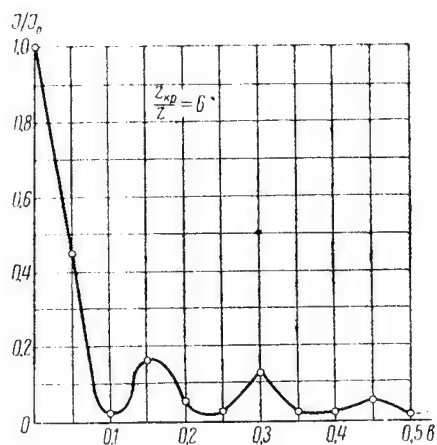


Рис. 7. Теоретическая кривая структуры интерференционного поля поршневого излучателя, $\frac{z_{kp}}{z_0} = 6$

или, в случае интересующего нас распределения интенсивности по сечению пучка, получим:

$$\frac{I_{возм}}{I_{осев}} = \left| \frac{\varphi_{возм}}{\varphi_{осев}} \right|^2 = J_0^2 \left(4 \frac{z_{kp}}{z_a} b \right) - 3b^2 J_0 \left(4 \frac{z_{kp}}{z_a} b \right) J_2 \left(4 \frac{z_{kp}}{z_a} b \right) + b^2 J_1^2 \left(4 \frac{z_{kp}}{z_a} b \right). \quad (18)$$

На рис. 5, 6 и 7 построены графики $\frac{I_{возм}}{I_{осев}} = f(b)$ для области с $n \leq 10\%$.

На рис. 8, 9 и 10 приведены экспериментально снятые при помощи ультразвукового микроскопа интерференционные поля круглой пластинки из пьезокерамики титаната бария. Данные опыта,

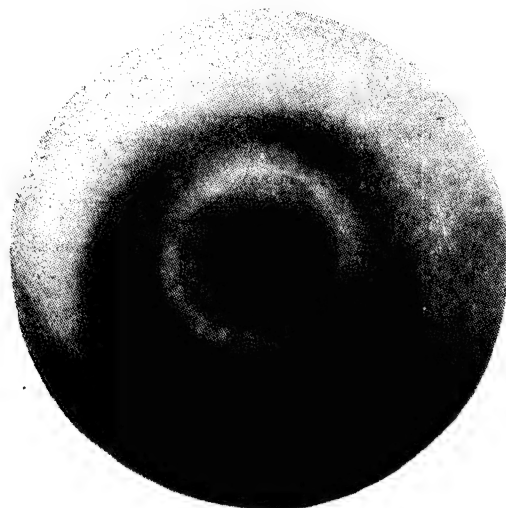


Рис. 8. Интерференционное поле круглой пьезо-керамической пластинки, $kr = 80$, $\frac{z_{kp}}{z_a} = 2$

снятые при $\frac{z_{kp}}{z_a} = 2$, $\frac{z_{kp}}{z_a} = 6,2$, удовлетворительно совпадают с теорией.

Результаты исследования структуры поля пьезоизлучателя ультразвукового микроскопа позволяют сделать следующие выводы:

Поле пьезоизлучателя ультразвукового микроскопа отлично от поля плоской волны, причем в непосредственной близости от излучателя это различие обусловлено в основном сложной формой колебания пластинки излучателя [до $z \leq (2 \div 4)r$], а на больших расстояниях основную роль играют интерференционные явления в пучке



Рис. 9. Интерференционное поле круглой пьезо-
керамической пластинки, $kr = 80$, $\frac{z_{kp}}{z_a} = 6,2$

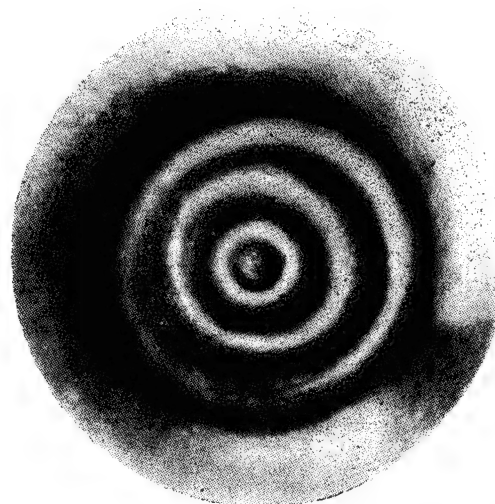


Рис. 10. Интерференционное поле круглой пьезо-
керамической пластинки, $kr = 80$, $\frac{z_{kp}}{z_a} = 10$

конечных размеров. Положение интерференционных колец определяется корнями функции Бесселя нулевого порядка от аргумента $4 \frac{z_{kp}}{z_a} b$, а функции Бесселя первого и второго порядка действуют на интерференционную картину сглаживающим образом, уменьшая разность между max и min значениями поля. Острота центральных и скорость спада интенсивности периферийных колец возрастают с увеличением $\frac{z_{kp}}{z_a}$, т. е. с приближением к излучателю. На рис. 10, например, интенсивность удаленных от оси колец настолько мала, что они не наблюдаются одновременно с центральными.

Следовательно, в целях уменьшения влияния сложной структуры поля излучателя на изображение можно рекомендовать две следующие зоны положения излучателя относительно преобразователя (или относительно плоскости предметов линзы, в случае применения акустической оптики):

- 1) $\frac{z_{kp}}{z_a} \geq 10$, где еще не очень заметно влияние интерференционных колец (за исключением центрального максимума), но при $z \geq (2 \div 4) r$.
- 2) при $\frac{z_{kp}}{z_a} \geq 1$, где интерференционная структура также мало заметна.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Н. Ржевкин, К вопросу о волновом поле пьезокварцевого излучателя, ДАН, **16**, № 5, 1937.
2. Л. Бергман, Ультразвук и его применение в науке и технике И. Л., стр. 382, 1956.
3. С. Я. Соколов, Ультраакустический микроскоп, ЖТФ, **19**, № 2, 1949.
4. Meixner J. und Fritze V., Das Schallfeld in der Nähe der freischwingungen kolbenmembran, Zs. angew. Phys., **1**, № 12, 1949.
5. Зоммерфельд, Оптика, И. Л. стр. 403, 1953.
6. A. Carter and A. Williams, A New Expansion for velocity Potential of a Piston Source, JASA, **23**, № 2, 1951.
7. Р. О. Кузьмин, Бесселевы функции, ОНТИ, стр. 65, 1935.

Поступила в сентябре 1956.

Инж. П. В. ПОНОМАРЕВ

ОПЫТНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ВИДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ

Существует много методов визуализации ультразвуковых полей. Их подробное описание дается в обзорной статье Л. Д. Розенберга [1]. Однако большинство из них обладает существенным недостатком — малой чувствительностью звукооптического преобразования. Наилучшим с этой точки зрения является метод, предложенный С. Я. Соколовым [2, 3], основанный на использовании пьезоэлектрической пластинки для преобразования ультразвукового поля в рельеф пьезозарядов с механическим сканированием последнего. Позднее механическое сканирование было применено еще несколькими авторами [4, 5]. Этот метод был положен в основу прибора, разработанного в лаборатории профессора С. Я. Соколова, описанию которого посвящена настоящая статья.

Основным элементом прибора является приемная кварцевая пластинка, каждая точка которой колеблется в соответствии с интенсивностью падающего на нее звука, вне зависимости от интенсивности колебаний соседних точек. В результате на пластинке возникает рельеф зарядов, достаточно точно передающий картину распределения ультразвукового поля около поверхности пластинки. Путем механического обегания последовательно всех точек кварцевой пластинки специальным щупом пьезозаряды преобразуются в переменное напряжение, модулирующее по яркости источник света,двигающийся синхронно со щупом. Таким образом, создается видимое изображение ультразвукового поля.

Механическое сканирование в приборе осуществляется совмещением двух колебательных движений: в горизонтальном и вертикальном направлениях, причем частота горизонтальных колебаний превышает частоту вертикальных в 40 раз; в результате образуется растр из 40 строк. Схематически механизм развертки показан на рис. 1, на котором цифрой 1 обозначен щуп, снимающий пьезоэлектрические заряды с кварцевой пластинки. Щуп закреплен на трубке, жестко соединенной с ползунком 2. Ползунок совершает

вертикальное колебательное движение, скользя по направляющим ползкам 3, и вместе с последними колеблется горизонтально.

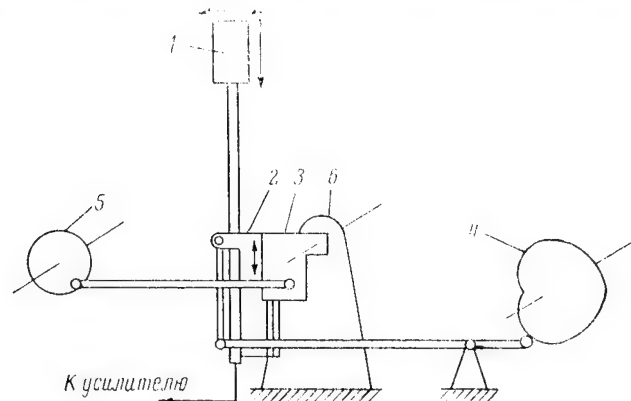


Рис. 1. Схема механической части прибора

1 — шуп; 2 — ползунок; 3 — направляющие ползком; 4 — эксцентрик; 5 — кривошип

Как видно из схемы, вертикальное колебательное движение осуществляется с помощью эксцентрика 4, а горизонтальное — с помощью кривошипа 5.

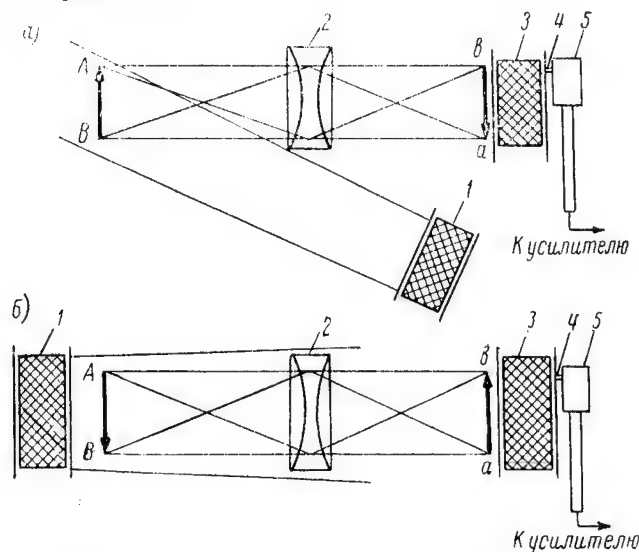


Рис. 2. Получение акустического изображения

1 — излучатель; 2 — акустическая линза; 3 — приемный вибратор; 4 — шуп;
5 — катодный повторитель

Движение шупа непосредственно по кварцевой мозаике приводит к его быстрому износу. Поэтому заряды с кварца снимаются

через промежуточную емкость тонкого воздушного слоя или пленки из мягкого диэлектрика, наложенной на кварцевую мозаику. Наличие пленки обеспечивает большую эффективность передачи зарядов за счет увеличения переходной емкости, но в этом случае возникают статические заряды трения, создающие помехи основному сигналу.

Сигнал, снимаемый с кварца, усиливается резонансным усилителем, на входе которого имеется катодный повторитель. С выхода

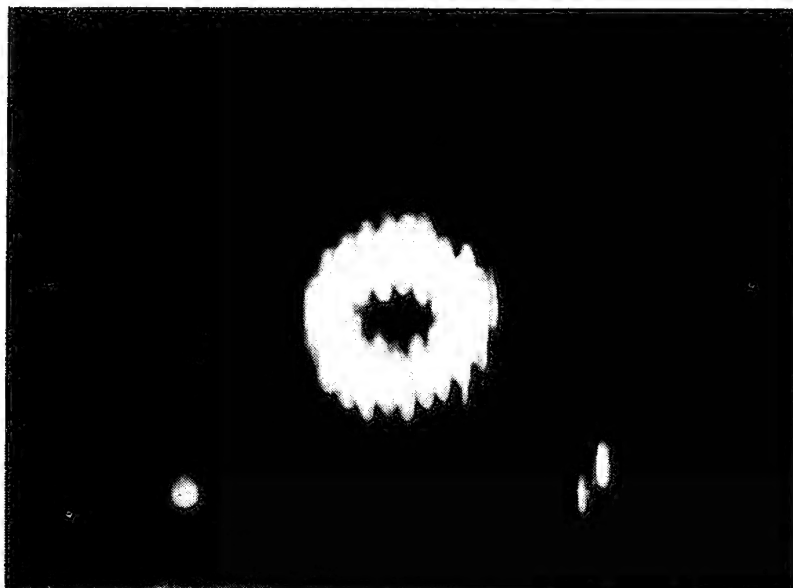


Рис. 3. Изображение кольца, полученное методом отражения

резонансного усилителя сигнал подается на сетку осциллографической трубки непосредственно без детектирования, чтобы избежать громоздких переходных конденсаторов, применение которых было бы необходимо, так как низшая частота видеосигнала составляет доли герца. Для уменьшения мелькания изображения в приборе используется трубка с длительным послесвечением.

Ультразвуковое изображение на кварцевой пластинке может быть получено с помощью фокусирующих устройств, аналогичных применяемым в оптике, т. е. линз, сферических зеркал или зональных пластинок. В данном приборе применялись акустические линзы с различными диаметрами и фокусными расстояниями. Нужно отметить, что получение качественных изображений сильно тормозится отсутствием хороших ультразвуковых линз.

Получение акустического изображения в приборе осуществлялось как методом отражения (рис. 2а), при котором изображение со-



Рис. 4. Изображение круглого искусственного расслоения в стальном листе

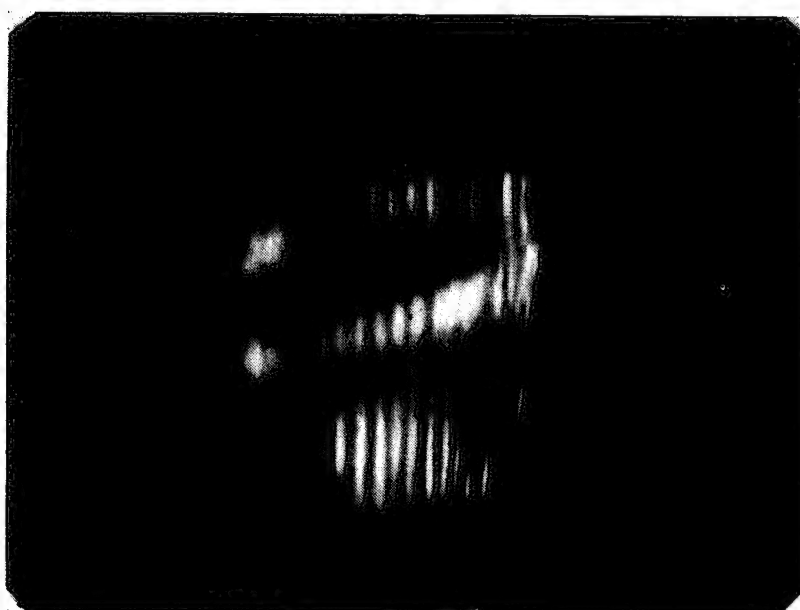


Рис. 5. Снимок человеческой руки

дается отраженным звуком, так и тeneвым методом (рис. 2б), когда рассматриваемый предмет помещается между излучателем и линзой.

На рис. 3 дается изображение кольца, полученное методом отражения, причем кольцо помещалось за двойным фокусным расстоянием линзы и его изображение является уменьшенным. На рис. 4 дано изображение круглого искусственного расслоения в стальном листе, толщиной 20 мм. На рис. 5 приведен снимок человеческой руки. Две темные полосы соответствуют локтевой и лучевой костям. Оба последние изображения были получены тeneвым методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Д. Розенберг, Акустический журнал, 1, 99, 1955.
2. С. Я. Соколов, Авторское свидетельство № 49426 от 31, 8, 1936, американский патент № 2164185 от 8, 7, 1937.
3. С. Я. Соколов, Журнал техн. физ., 19, 1001, 1941.
4. O. Barbie, Alta Frequenza, 11, 383, 1944.
5. E. E. Suckling, W. R. Maclean, JASA, 27, 297, 1955.

Поступила в сентябре 1956.

*Проф. А. Г. ГРАММАКОВ,
канд. техн. наук В. М. ОРЛОВ, инж. В. П. АНТОНОВ*

НЕЙТРАЛИЗАТОР СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ДЛЯ ПЛОСКОПЕЧАТНЫХ ТИПОГРАФСКИХ МАШИН

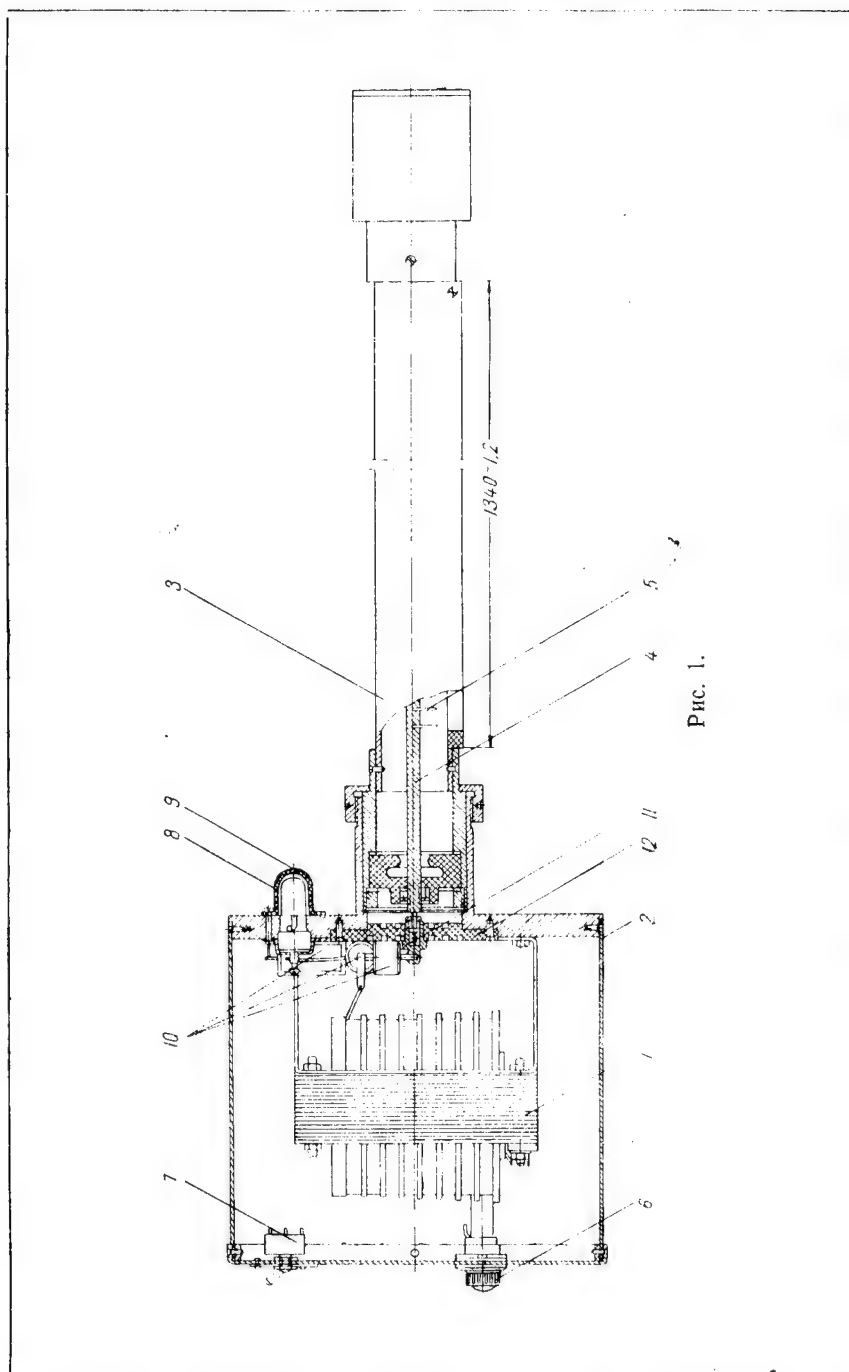
Одним из факторов, тормозящих производственный процесс в типографиях, является электризация бумаги (так называемая „магнитность“ бумаги) [1]. Изучение проявлений статического электричества на плоскочастных двухоборотных машинах [2] дало возможность сконструировать нейтраллизаторы статического электричества, позволяющие снизить потенциалы наэлектризованной бумаги до величин, практически не препятствующих бесперебойному процессу печатания [3].

Действие нейтраллизатора статического электричества основано на использовании ионизации воздуха, осуществляемой разрядом с остриев, на которые подается напряжение от высоковольтного трансформатора.

Нейтраллизатор (НС-4) состоит из питающего высоковольтного трансформатора, ограничивающей емкости и сопротивления, а также коронирующего электрода.

Питающий трансформатор промышленной частоты 127/6500—8000 в, с возможностью переключения на 220/6500—8000 в, мощностью около 50 вв, выполнен по несимметричной схеме. Охлаждение воздушное. Намотка высоковольтной (вторичной) обмотки — галетная, первичной — обыкновенная (виток к витку). Железо Ш-образное. Трансформатор расположен в металлическом кожухе и имеет сигнализацию (неоновую лампу) подачи напряжения на вторичную обмотку, а также переключатель напряжения на два положения, для обеспечения нейтраллизации бумаги как при средней, так и при весьма интенсивной ее электризации.

Коронирующий электрод представляет собой металлическую трубку диаметром около 5 мм, длиной 1100 мм с напаянными вдоль нее в один ряд на расстоянии 1 см друг от друга иглами. В рабочем положении электрод жестко соединен с трансформатором. Однако конструкция нейтраллизатора позволяет легко и быстро производить замену высоковольтного электрода. Этот электрод



помещен на изоляторах в металлическую трубу диаметром около 40 мм, длиной 1180 мм.

Металлическая труба по всей длине со стороны игл имеет продольную щель шириной около 35 мм, прикрытую текстолитовой планкой с узкой прорезью (шириной 3—3,5 мм).

Внешняя труба скреплена с кожухом трансформатора и заземляется.

Высоковольтный электрод сделан сменным, заменяемым. Вызвано это тем, что при длительной работе нейтрализаторов в типографии, острия высоковольтного электрода покрываются пылью, краской и притупляются; работа нейтрализатора ухудшается. Чтобы сохранить эффективность работы нейтрализаторов, высоковольтный электрод должен периодически подвергаться чистке. Замена электрода позволяет удобно производить чистку остриев.

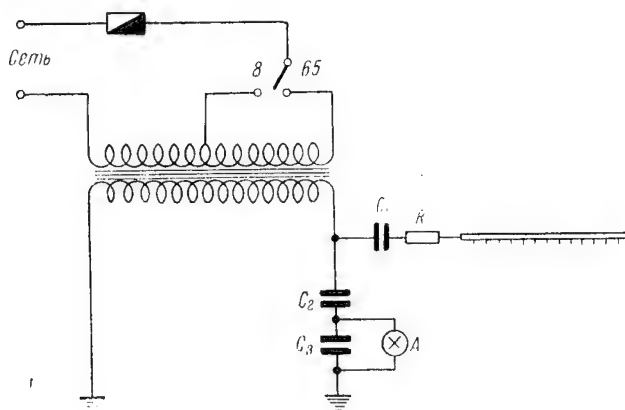


Рис. 2.

Опыты показали, что к одному трансформатору можно присоединить параллельно несколько трубок с высоковольтными электродами, что обеспечит возможность нейтрализации зарядов на больших поверхностях.

Высокое напряжение со вторичной обмотки трансформатора через последовательно включенную электроемкость и электрическое сопротивление подается на коронирующий электрод. Электроемкость и сопротивление служат для ограничения тока и обеспечения безопасности установки.

На рис. 1 изображен общий вид нейтрализатора: 1 — трансформатор, 2 — кожух трансформатора, 3 — труба нейтрализатора, 4 — высоковольтный электрод, 5 — иглы, 6 — предохранитель, 7 — тумблер, 8 — неоновая лампочка МН-3, 9 — колпачок из органического стекла, 10 — конденсаторы (три), 11 — контакт пружинный, 12 — плата изоляционная.

На рис. 2 приведена принципиальная электрическая схема нейтрализатора вместе со схемой включения неоновой лампы: $C_1 = C_2 = 500 \text{ пф}$

а рабочее напряжение 10 кВ, $R = 1 \text{ мгом}$, $C_3 = 4600 \text{ пф}$ на рабочее напряжение 500 В, А — неоновая лампа.

Нейтрализатор укрепляют на печатной машине над серединой приемного стола, параллельно листам бумаги, на расстоянии 10—15 см от бумаги, несколько выше движущейся каретки.

В кожухе высоковольтного электрода предусмотрено отверстие, через которое, в случае необходимости, можно продуть ионизованный воздух к наэлектризованной поверхности.

Конструкция нейтрализатора обеспечивает электробезопасность в условиях эксплуатации, благодаря выполнению следующих мероприятий:

- а) применению несимметричной схемы трансформатора;
- б) применению ограничивающих элементов схемы, которые ограничивают ток прикосновения до безопасной величины (сила тока к. з. не выше 1 миллиампера);
- в) надежности и видимости электрического соединения кожуха трансформатора и корпуса коронирующего электрода нейтрализатора с заземляющим контуром;
- г) надежности контакта между высоковольтным источником питания и коронирующим электродом.

Нейтрализаторы были установлены на плоскочечатных машинах в типографии им. Евг. Соколовой и в типографии им. Володарского в г. Ленинграде. Их эксплуатация за последние несколько лет показывает удовлетворительные результаты [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Г. Дроздов, Статическое электричество в промышленности, Госэнергоиздат, 1949.
2. В. М. Орлов, П. М. Хропова, Р. Ф. Комиссарова, А. Е. Беркут, Журнал „Полиграфическое производство“, № 6, 1951.
3. А. Г. Граммаков, В. М. Орлов, М. А. Березкин, Н. И. Комяк, Журнал „Полиграфическое производство“, № 3, 1955.
4. А. Е. Беркут, А. Г. Граммаков, В. М. Орлов, П. М. Хропова, Журнал „Полиграфическое производство“, № 4, 1957.

Поступила в декабре 1956 г.

Канд. техн. наук, доц. А. П. КРАССОВСКИЙ

**КООПЕРАЦИЯ СЕРИЙНЫХ ПОЛУФАБРИКАТНЫХ ЦЕХОВ
С ПОТОЧНЫМ СБОРОЧНЫМ ИЛИ КОМПЛЕКСНЫМ
НЕПРЕРЫВНЫМ ПОТОКОМ?**

(Электровacuумное приборостроение)

Основные цехи электровacuумного производства серийного и массового типа могут быть отнесены к двум группам:

1. Заготовительно-обработочные цехи, специализированные по видам полуфабрикатов: цех, изготавливающий ножки приборов различных типов, цех, производящий различные сетки, и т. п.

2. Сборочные цехи, специализированные по „предметному“ признаку, по однородности или по близкой схожести собираемых в них и выпускаемых ими готовых приборов: цех приемно-усилительных приборов, цех генераторных приборов и т. п.

При программных количествах изделий, изготовлявшихся в годы прошедших пятилеток и при сравнительно значительной продолжительности сборочных, вакуумных, тренировочных операций, выделение узко специализированных предметных сборочных поточных линий уже являлось целесообразным. Целесообразным как технологически, так и экономически потому, что это дает достаточно полную загрузку выделяемого специального оборудования и высокое использование времени рабочих сборочных потоков. Длительность же операций полуфабрикатов настолько невелика, что для достаточно полной загрузки оборудования полуфабрикатных цехов (например, цеха сеток) этим цехам необходимо было поручать серийное изготовление полуфабрикатов (например, партий разных ножек) для различных изделий.

В шестой пятилетке, по директивам XX Съезда КПСС, выпуск электровacuумных приборов возрастает в 2,6 раза.

В этих условиях возникает вопрос, целесообразно ли для изделий, заданных к изготовлению в массовых количествах, и впредь проектировать и организовывать изготовление деталей и частей в кооперированных полуфабрикатных цехах с перевозкой их

в сборочные цехи? Не правильнее ли организовать комплексные поточные цехи, включающие полуфабрикатные поточные линии, вливающиеся в главный непрерывный поток, который будет собирать и выпускать готовые комплектные изделия?

Этот вопрос возник перед дирекцией одного завода летом 1956 г., когда потребовалось проектировать и безотлагательно организовать в новом здании производство очень большого количества новых приборов одинакового типа.

Для совместного решения этого вопроса завод заключил договор социалистического содружества с кафедрой Организации и экономики производства Ленинградского электротехнического института им. В. И. Ульянова (Ленина).

В задачу кафедры входило установить методику решения вопроса и дать конкретную экономическую экспертизу для выбора одного из двух названных вариантов организации производства полуфабрикатов.

Технологические, пространственные вопросы по договору решались отделом Главного технолога завода, им же были даны исходные нормы времени, положенные в основу расчетов.

Перечень полуфабрикатов, для которых требовалось выбрать вариант организации производства, включал: колбу прибора, ножку к нему, анод, три разновидности экранов, пистон и три разновидности сеток. Катоды должны были получаться по межзаводской кооперации от специального завода.

„Старые“, существующие цехи, расположенные на расстоянии около полукилометра от нового здания и изготавливающие аналогичные полуфабрикаты, были полностью загружены выполнением поставок для сборочных цехов, расположенных в старом здании и выпускающих приборы различных других типов.

Практически требовалось сопоставить два варианта:

1. На одном из этажей нового здания будет размещен мощный непрерывный поток, собирающий и выпускающий готовые приборы одного лишь заданного типа. В некоторых других этажах этого здания будут размещены кооперированные серийные полуфабрикатные цехи, поставляющие свою продукцию различным сборочным цехам (выпускающим приборы различных типов), в частности, поставляющие рассматриваемому непрерывно поточному сборочному цеху.

2. Полуфабрикаты, необходимые для рассматриваемого сборочного непрерывного потока, должны производиться на поточных „линейках“, непосредственно примыкающих к сборочному потоку. Каждая из этих поточных линеек будет изготавливать особый вид одинаковых полуфабрикатов и при помощи коротких транспортных конвейеров подавать их только к операциям главного непрерывного сборочного потока.

В целом образуется комплексный непрерывный поточный цех, изготавливающий комплектные приборы одного заданного типа, не зависящий от полуфабрикатных цехов.

* * *

Исследование и сопоставление затруднялось тем, что оборудование нового типа, предназначенное для рассматриваемых заготовительных участков, еще не было отрегулировано, а частью еще не было получено.

Трудоемкость технологических операций и затраты по соответствующей заработной плате показаны в табл. 1 *) для обоих вариантов организации производства. Отношение трудоемкости II варианта к I составляет в среднем $40,3 : 51,7 = 0,78$; это объясняется повышенной автоматизацией основных и транспортных операций при II варианте организации, а также большей специализацией рабочих, четкой ритмичностью каждой операции, содействующей скоростным навыкам рабочих. В свою очередь, трудоемкость I варианта в среднем на 20—30% ниже трудоемкости аналогичных операций, выполняемых в старых цехах. Это объясняется применением в новом здании нового, более производительного оборудования.

Таблица 1

Трудоемкость изготовления 1000 штук полуфабрикатов

Полуфабрикаты и операции	В кооперированных серийных цехах		На поточных линиях комплексного потока		Разряд работы	Род работ	Тарифн. ставки руб/час
	нормы времени	зар. плата	нормы времени	зар. плата			
Ножка СБЗ·351·005							
Резать заготовку	0,83	2,07	0,46	0,99	5/4	г. сд.	2,47/2,15
Штамповать и отжечь	2,78	5,98	1,38	2,96	4	" "	2,15
Подрезать, формовать	5,27	11,00	4,66	8,95	4	х. сд.	1,92
Травить	1,03	2,04	1,03	1,98	4	г. пв.	1,92
Колба СБ5·360·001	9,91	21,09	7,53	14,88			
Резать	1,1	2,38	0,63	1,36	4	г. сд.	2,15
Выдувать	1,39	2,98	0,87	1,87	4	" "	2,15
Маркировать	1,39	2,98	1,39	2,98	4	" "	2,15
Калибровать	1,1	2,38	1,05	2,26	4	" "	2,15
Штенгелевать	3,34	7,2	2,04	4,43	4	" "	2,15
Мыть	2,78	5,31	2,78	5,31	4	х. сд.	1,92
Сушить	0,32	0,61	0,32	0,61	4	г. пв.	1,92
	11,42	23,84	9,08	18,82			

*) Таблицы 1, 2 и 4 приведены лишь для двух полуфабрикатов.

Себестоимость рассматриваемых полуфабрикатов подсчитана в табл. 2 как для варианта их изготовления в кооперированных серийных цехах, так и для варианта поточного производства их в комплексном цехе. Там же показано снижение трудоемкости и снижение себестоимости полуфабрикатов при организации их производства по второму варианту. Прямые затраты на материалы и на основную заработную плату подсчитаны на основании норм, установленных отделом главного технолога, по ценам на материалы и по тарифной сетке, действовавшей на заводе в период проектирования.

Основные причины снижения трудоемкости при втором варианте уже указаны, они же вызывают снижение затрат по прямой заработной плате: дополнительная причина — снижение тарифного разряда работы на отдельных операциях при переходе к узко специализированным операциям поточного метода.

Наиболее значительное снижение затрат на материалы произойдет по анодам, где алюминированный никель (0,7 кг на 1000 шт. при цене 160,1 руб/кг) заменяется алюминированным железом (0,6 кг при цене 27 руб/кг).

Процент цеховых расходов для варианта изготовления полуфабрикатов в кооперированных серийных цехах принят равным проценту аналогичных существующих цехов в старом здании: для ножек и колб (по цеху № 12) 320%, а для анода и прочих полуфабрикатов (по цеху № 16) 300%.

Для варианта изготовления рассматриваемых полуфабрикатов в комплексном поточном цехе процент цеховых расходов должен снизиться за счет их условно постоянной части, вследствие сокращения производственных циклов этих полуфабрикатов, за счет отпадения затрат на серийные переналадки рабочих мест и за счет четкой ритмичности однотипного производства на всех полуфабрикатных линейках, при почти полном совпадении тарифных разрядов основных рабочих этих линеек.

Противоположное влияние (в сторону некоторого повышения процента цеховых расходов на полуфабрикатных линейках) должно оказать выявленное выше снижение на них фонда основной производственной заработной платы (по сравнению с первым вариантом) и некоторое повышение амортизационных отчислений, вызываемое введением большого количества конвейеров.

Учитывая сказанное, процент цеховых расходов для второго (поточного) варианта был установлен на уровне 300% к основной производственной заработной плате; эта заведомо завышенная цифра ставит II вариант в менее благоприятные условия.

Табл. 2 показывает очередность и методику подсчета себестоимости полуфабрикатов. Второй (поточный) вариант производства полуфабрикатов дает по сравнению с первым снижение себестоимости около 238 рублей на каждую тысячу комплектов всех рассматриваемых полуфабрикатов, а по всей годовой программе около

$$5\,500\,000 \times \frac{238}{1000} = 1\,290\,000 \text{ рублей.}$$

Таблица 2

Калькуляция себестоимости 1000 штук полуфабрикатов по нормативам кооперированных серийных цехов и поточных линий комплексного поточного цеха

Полуфабрикаты	Трудо- емкость н/час	В рублях					Всего
		мате- риал	зара- ботная плата	цех. расходы		обще- завод. расходы	
				%	руб.		
Ножка Б5.351.005							
Колба СБ5.360.001							
Анод никель — алюминий ТС7.301.059 желе- зо — алюминий							
Экран ТС7.312.068							
Экран ТС7.312.069							
Экран Ножки СБ7.312.003							
Пистон ТС7.331.066							
Сетки I, II и III (для обоих ва- риантов)							

Экономия в процентах:

Длительность производственного цикла транспортной партии полу

Полуфабрикаты операции	Род оборудования	Норма времени на 1 штуку в секундах			Род тары	Емкость	Трансп. партия	Такт автомата
		T_p	$T_{\text{ж}}$	$T_{\text{оп}}$		шт.	шт.	сек/шт.
<hr/>								
Ножка								
СБ5 · 351 · 005								
Резать заготовки	Авт. барабанный	3	60	60	кор.	500	500	3
Штамповать	П/автомат 24- шпинд.	2×5	115	120	—	—	—	5
Отжечь	Конв. печь	—	1260	1260	кор.	300	300	—
Подрезать	{ Настольные приспос.	6	—	6	»	300	300	—
Формовать		13	—	13	»	300	300	—
Контроль		Стол	5	—	5	»	300	300
Выб. контр. 10 ⁰ / ₀	»	5	—	5	»	300	300	—
ПРБ. ц. 12	—	—	—	—	»	300	300	—
ПРБ. ц. 11	—	—	—	—	»	—	—	—
Травить	Ванна	3,7	—	900	»	300	300	—
Отправить на сборочный поток								
<hr/>								
Колба								
СБ5 · 360 · 001								
Резать	П/авт. бара- банный	4	80	80	кор.	500	500	4
Выдуть	Станок 15-по- зиционный	5	70	75	»	500	500	—
Калибровать	П/авт. 24 шп.	4	88	92	»	100	500	4
Контроль	Стол	5	—	5	»	100	500	—
Штенгелевать	П/автом.	12	54	66	—	—	—	6
Отжечь	Тунн. кон- вейерн. печь	—	660	660	кор.	100	500	—
Контроль	Стол	5	—	5	»	100	500	—
Промыть	Ванна	10	—	—	»	100	500	—
Сушить	Суш. шкаф	1,2	600	1200	стойки	100	500	—
Контроль	Стол	5	—	5	кор.	100	500	—
Контроль	»	5	—	5	»	100	500	—
ПРБ. ц. 12	—	—	—	—	—	—	—	—
ПРБ. ц. 11	—	—	—	—	—	—	—	—
Отправить на сборочный поток								

Таблица 3

фабрикатов при изготовлении в кооперированных серийных цехах

Длительность операции 1 тр. партии, мин.			Род транспорта	Скорость конвейера, м/мин	Путь 1 транспортной партии, м	Продолж. 1 транспортной партии, мин.	Пролетание 1 транспортной партии, мин.	Производственный цикл, мин.
T_p	T_m	$T_{оп}$						
25 +	1	26	ручн.	—	25	0,33	—	26,33
24,9	+ 1,7	26,6	автом.	—	—	—	—	26,6
	46	46	ручн.	—	7	0,1	—	46,01
30	—	30	»	—	1	—	35	65,0
65	—	65	»	—	13	0,2	—	65,2
25	—	25	»	—	18	0,3	—	25,3
2,5	—	2,5	»	—	50	0,75	—	3,25
—	—	—	»	—	50	6	750	756,0
—	—	—	лифт.	—	30	0,5	30	30,5
6	18	24	ручн.	—	35	0,7	—	24,7
Производственный цикл 1 транспортной партии								1068,89 (17,7 час.)
33,4	+ 1,33	34,73	ручн.	—	1	0,02	—	34,75
42,5	+ 1,5	44,0	»	—	2	0,03	—	44,0
33,4	+ 1,5	34,9	»	—	10	0,16	—	35,0
—	41,68	41,68	»	—	14	0,16	—	41,8
54 + 6,500		51	—	—	—	—	10	61,0
—	60							
—	11	11	—	—	16	0,25	—	11,25
41,67	—	41,68	»	—	29	0,4	—	42,08
16,7	—	16,7	»	—	29	0,4	—	17,1
10 +	20	30	»	—	3	0,05	—	30,5
41,68	—	41,68	»	—	7	0,1	—	41,78
41,68	—	41,68	»	—	24	0,33	—	42,01
—	—	—	»	—	50	6	750	756,0
—	—	—	»	—	10	0,16	30	30,16
Производственный цикл 1 транспортной партии								1187,43 (19,8 час.)

Длительность производственного цикла транспортной партии полуфабри

Полуфабрикаты операции	Род оборудования	Норма времени на 1 штуку, сек.			Род тары	Емкость, шт.	Трансп. партия, шт.	Такт автомата, сек/шт.
		T_p	T_m	$T_{оп}$				
Ножка								
Резать загот.	П/авт. станок бараб.	1,65	33	33	ящик	1000	1000	1,65
Штамповать	П/а 24-шпинд.	4,95	113,8	118,8	—	1	1	4,95
Отжечь	Конв. эл. печь	—	1260	1260	кор.	100	300	4,95
Подрезать и формовать	Стол	16,8	—	16,8	—	100	—	—
Контроль	—	5,64	—	5,64	—	100	300	—
Травить	Ванна с сеткой	3,7	—	900	—	100	300	—
Отправить на сборочную линию								
Колба								
Резать загот.	П/авт. бараб.	2,25	45	45	ящик	500	500	2,25
Выдувать	15 позиц. стан.	$\frac{6,25}{2}$	87,35	93,6	кор.	500	500	6,25
Маркировать	Стол	5	—	5	—	500	500	—
Калибровать	24-шп. п/а	3,78	83,16	87	—	500	500	3,78
Штенгелевать	П/а 24-шп.	$\frac{14,7}{2}$	66,3	81	—	—	2	7,35
Отжечь	Тунн. печь	—	480	480	—	500	500	7,35
Контроль	Стол	3,76	—	3,76	—	100	500	—
Отправить на сборочную линию								

Длительность производственного цикла каждой разновидности рассматриваемых полуфабрикатов определена особо для двух сопоставляемых вариантов организации производства — см. табл. 3, 4 и 5 *).

Производственные циклы определены в условиях соответствующего рода транспорта, вида и емкости тары, целесообразной величины транспортной партии, с учетом длины транспортных маршрутов, скорости перемещения и продолжительности пролеживания полуфабрикатов в складских заделах. Все эти величины показаны в табл. 3 и 4. Наиболее просто величины этих таблиц могли быть рассчитаны для варианта производства полуфабрикатов на массово-поточных линиях (см. табл. 4). Пространственный план комплексного потока показывал расстояния, ритм (такт) сборочного потока, заданный программой выпуска изделий, диктовал ритм работы всех

*) См. сноску на стр. 235.

Таблица 4

катов при изготовлении на линиях комплексного непрерывного потока

Длительность операции 1 трансп. партии, мин.			Род транспорта	Скорость конвейера, м/мин	Путь 1 транспортной партии, м	Продолж. тр-та 1 транспортной партии, мин.	Пролегивание 1 транспортной партии, мин.	Производственный цикл, мин.
T_p	T_m	$T_{оп}$						
27,5	0,55	28,05	ручн.		9	0,367	---	28,41
24,75	1,97	26,7	авт.	---	---	---	---	26,7
	21	45,7	---	---	---	---	---	45,7
84	84	84	ручн.	---	1	---	---	84,0
28	28	28	конв.	1,2	12	10	---	38,0
6	18	24	"	1,2	61	47	---	71,0
Производственный цикл 1 транспортной партии								293,81 (4,9 час.)
---	19,5	19,5	ручн.	---	17	0,33	---	19,83
---	---	26	"	---	1	0,02	---	26,0
41,6	---	41,6	"	---	---	---	---	41,6
---	---	32,8	"	---	1	0,02	---	32,82
---	---	1,3	---	---	---	---	---	1,33
---	---	60,9	конв.	1,3	10	7,7	---	68,6
31,2	---	31,2	"	1,3	42	32,4	---	63,6
Производственный цикл 1 транспортной партии								253,87 (4,22 час.)

полуфабрикатных ленток, а скорости конвейеров определили продолжительность перемещения очередных транспортных партий в потоке. Для варианта производства полуфабрикатов в кооперированных серийных цехах, расположенных в различных этажах зданий, характерна межцеховая передача транспортных партий полуфабрикатов через цеховые кладовые полуфабрикатов. Цикл полуфабрикатов при этом варианте (см. табл. 3) весьма удлинится за счет междучеховых перевозок и за счет пролеживания их в складах межцеховых кладовых. Длительность таких перевозок и пролеживания в кладовых выборочно проверялась хронометражными замерами и подсчетами по практике аналогичных перевозок между кооперированными цехами старого здания.

Сопоставление производственных циклов T одной транспортной партии рассматриваемых полуфабрикатов приведено в табл. 5.

Коэффициент связывания $K_{св}$ оборотных средств, в процессе производства транспортной партии и какой-либо производ-

Таблица 5

**Длительность производственного цикла изготовления и подачи
на сборку одной транспортной партии полуфабрикатов**

Название и обозначение полуфабриката	В кооперирован- ных серийных цехах		На массово-поточ- ных участках комплексного цеха		Сокра- щение произв. цикла $\frac{T'}{n'} : \frac{T''}{n''}$
	размер трансп. партии, шт.	произв. цикл T' , час.	размер трансп. партии, шт.	произв. цикл T'' , час.	
Ножка СБК.351.005	300	17,7	300	4,9	3,6
Колба СБК.360.001	500	19,8	500	4,22	4,7
Анод ТС7.301.059	300	48,8	300	2,28	21,2
Экран ТС7.312.068	500	47,6	300	2,03	23,5
Экран ТС7.312.069	500	48,5	300	2,03	23,9
Экран ножки ТС7.312.003	500	47,6	300	1,98	14,4
Пистон ТС7.331.066	1000	5	1000	1,3	2,84
Сетка I	300	12,45	300	4,45	2,8
" II	300	12,45	300	4,45	2,8
" III	300	12,08	300	4,08	2,95

ности полуфабриката, с достаточной точностью может быть под-
считан так:

$$K_{св} = \left(\frac{C_1 + C_2}{2} \right) nT : (C_2 nT) = \frac{C_1 + C_2}{2C_2},$$

где

C_1 — себестоимость заготовки (материала), поступающей на пер-
вую операцию, в рублях;

C_2 — себестоимость готового полуфабриката, подаваемого на
сборочный участок, в рублях;

n — транспортная партия, в штуках;

T — продолжительность производственного цикла транспортной
партии полуфабриката, в единицах времени.

Руководствуясь этим и пользуясь величинами, указанными
в таблицах 2 и 5, можно рассчитать коэффициенты связывания при
сопоставляемых вариантах организации производства для различных
полуфабрикатов. Это и выполнено в табл. 6.

Средняя ценностная величина H_0 незавершенного про-
изводства в сфере каждого производства рассматриваемых
полуфабрикатов определится так:

$$H_0 = \frac{N}{ДЕЧ} TK_{св} C_2 \text{ рублей,}$$

где

N — заданное к производству количество однородных предметов
на планируемый период, в штуках;

$Д$ — количество рабочих дней в планируемом периоде;

$Е$ — " " смен в рабочем дне;

$Ч$ — " " часов в рабочей смене.

Таблица 6

Расчет коэффициентов связывания оборотных средств в процессе производства полуфабрикатов

Полуфабрикаты	В кооперированных серийных цехах			На массово-поточных участках комплексного поточного цеха		
	рублей		$K'_{св}$	рублей		$K''_{св}$
	C'_1	C'_2	$\frac{C'_1 + C'_2}{2C'_2}$	C''_1	C''_2	$\frac{C''_1 + C''_2}{2C''_2}$
Ножка	58,18	159,57	0,68	42,56	111,44	0,695
Колба	97,76	212,9	0,74	96,80	183,8	0,77
Анод	114,14	169,28	0,84	18,81	34,24	0,77
Экран (068)	19,77	33,44	0,8	19,77	31,09	0,82
Экран (069)	19,69	48,20	0,706	19,69	30,99	0,82
Экран ножки	9,01	23,68	0,69	9,01	20,33	0,724
Пистон	7,83	16,76	0,73	5,76	13,23	0,715
Сетки I, II, и III, в среднем	79,78	154,69	0,78	79,78	154,69	0,78

Соответственно этому подсчитана таблица 7.

Коэффициент оборачиваемости оборотных средств на участке производства рассматриваемых полуфабрикатов

$$K_{об} = \frac{NC_2}{H_0}$$

$$K_{об} = NC_2 : \left(\frac{N}{ДЕЧ} TK_{св} C_2 \right) = \frac{ДЕЧ}{K_{св} \cdot T}.$$

Соответственно этому, на основании табл. 5 и 6, рассчитана табл. 8.

Ускорение оборачиваемости оборотных средств в сфере производства рассматриваемых полуфабрикатов

$$\frac{K''_{об}}{K'_{об}} = \frac{T' K'_{св}}{T'' \cdot K''_{св}}.$$

На основании этого выражения составлена табл. 8.

Необходимая величина оборотного фонда в сфере производства массово-поточных участков полуфабрикатов составит, по сравнению с вариантом их изготовления в кооперированных цехах:

$$\frac{H_0''}{H_0'} = \frac{T'' \cdot K''_{св} \cdot C_2''}{T' \cdot K'_{св} \cdot C_2'};$$

$$\frac{H_0''}{H_0'} = \frac{2007,5}{20443,5} \cdot 100 = 9,85\%.$$

Таблица 7

Расчет средней ценностной величины незавершенного производства на участках изготовления рассматриваемых полуфабрикатов

На участках кооперированных серийных цехов	На поточных линиях полуфабрикатов комплексного потока	Уменьшение
H'_0 , рублей	H''_0 , рублей	$\frac{H''_0}{H'_0}, \%$
Н о ж к а		
$\frac{5500000}{4688} \cdot 17,7 \cdot 0,68 \cdot \frac{159,7}{1000} = 2260$	$\frac{5550000}{4688} \cdot 4,9 \cdot 0,595 \cdot \frac{111,41}{1000} = 448$	19,8
К о л б а		
$1,172 \cdot 19,8 \cdot 0,71 \cdot 212 = 3650$	$1,172 \cdot 4,22 \cdot 0,77 \cdot 183,8 = 700$	19,2
А н о д		
$1,172 \cdot 48,8 \cdot 0,84 \cdot 169,28 = 8100$	$1,172 \cdot 2,28 \cdot 0,77 \cdot 31,21 = 70,5$	8,7
Э к р а н 068		
$1,172 \cdot 47,6 \cdot 0,8 \cdot 33,11 = 1492$	$1,172 \cdot 2,03 \cdot 0,82 \cdot 31,09 = 60,5$	4,05
Э к р а н 069		
$1,172 \cdot 48,5 \cdot 0,69 \cdot 18,2 = 1890$	$1,172 \cdot 2,03 \cdot 0,82 \cdot 30,99 = 60,3$	3,2
Э к р а н н о ж к и		
$1,172 \cdot 47,5 \cdot 0,69 \cdot 23,68 = 910$	$1,172 \cdot 1,98 \cdot 0,721 \cdot 20,33 = 33,8$	3,7
П и с т о н		
$1,172 \cdot 5 \cdot 0,73 \cdot 16,76 = 71,5$	$1,172 \cdot 1,3 \cdot 0,715 \cdot 13,23 = 14,4$	20
С е т к и I, II и III (в среднем)		
$1,172 \cdot 12,4 \cdot 0,78 \cdot 154,7 = 1750$	$1,172 \cdot 4,4 \cdot 0,78 \cdot 154,7 = 620$	35,4
Итого	20443,5	2007,5
		9,85

Цифры, приведенные в таблице 2, показывают, что трудоемкость изготовления 1000 комплектов рассматриваемых полуфабрикатов, при производстве их на линиях поточного комплекса, снижается в среднем в отношении $51,7 : 40,3 = 1,28$. Причины этого были уже указаны. Это не оставляет сомнения в значительном возрастании производительности труда при комплексно-поточном варианте; поэтому дальнейшие простые, но трудоемкие расчеты производительности труда здесь не приводятся.

Если снижение трудоемкости и объема незавершенного производства и повышение производительности труда при втором варианте в основном вызывается внедрением улучшенной техники и повышенной ритмичностью, то ускорение оборачиваемости оборотных средств --- совершенствованием методов организации производства.

Таблица 8

Расчет коэффициентов оборачиваемости оборотных средств
за 1 год в сфере производства полуфабрикатов

Полуфабрикаты	В кооперированных серийных цехах	На массово-поточных участках комплекс- ного поточного цеха	Увеличе- ние
	$K'_{об}$	$K''_{об}$	$\frac{K''_{об}}{K'_{об}}$
Пожка	$\frac{4688}{0,68 \cdot 17,7} = 388$	$\frac{4688}{0,695 \cdot 4,9} = 1378$	3,58
Колба	$\frac{4688}{0,74 \cdot 19,8} = 322$	$\frac{4688}{0,77 \cdot 4,22} = 1400$	4,34
Анод	$\frac{4688}{0,84 \cdot 48,8} = 114$	$\frac{4688}{0,77 \cdot 2,28} = 2670$	23,4
Экран	$\frac{4688}{0,8 \cdot 47,6} = 123$	$\frac{4688}{0,82 \cdot 2,03} = 2820$	23,2
Экран	$\frac{4688}{0,706 \cdot 48,5} = 136$	$\frac{4688}{0,82 \cdot 2,03} = 2160$	15,9
Экран ножки	$\frac{4688}{0,69 \cdot 47,6} = 136$	$\frac{4688}{0,724 \cdot 1,98} = 3260$	24
Пистон	$\frac{4688}{0,73 \cdot 5} = 128$	$\frac{4688}{0,715 \cdot 1,3} = 5000$	39,2
Сетки I, II и III в среднем	$\frac{4688}{0,78 \cdot 12,4} = 482$	$\frac{4688}{0,78 \cdot 4,4} = 1356$	2,8

Даже допуская некоторую степень неточности исходных норм, в результате исследования следует ожидать, что, при изготовлении рассматриваемых ножек, колб, анодов, экранов трех разновидностей, пистонов и сеток массово-поточным методом на территории комплексного поточного цеха, себестоимость комплектов продукции этой номенклатуры снизится по всей годовой их программе на сумму около 1 290 000 рублей, что составит около 29% от той их себестоимости, которая получается при их изготовлении в других кооперированных цехах. Производственные циклы рассматриваемых полуфабрикатов сократятся примерно в 3, в 14 и до 23 раз; оборачиваемость оборотного фонда в сфере производства ускорится в 3, в 20 и до 35 раз; средняя ценностная величина незавершенного производства на участках изготовления рассматриваемой продукции снизится около 90%.

В комплексно-поточном варианте сочетаются преимущества предметной и полуфабрикатной специализации и внутрицехового кооперирования, высокая степень ритмичности всех звеньев массового производства и равномерности выпуска продукции на основе непрерывно-поточного метода производства.

Поступила в июне 1957 г.

Канд. техн. наук, доц. К. В. БУЛГАКОВ

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И СТРУКТУРЫ ПРОЕКТИРУЕМЫХ ТЕПЛОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

I. Характеристика теплоэлектрических станций и недостатки их проектирования

Теплоэлектрические станции (ТЭЦ), вырабатывающие теплофикационную электроэнергию на базе отпускаемого со станции тепла (в виде пара или горячей воды), являются значительно более экономичными, чем конденсационные электростанции (КЭС), вырабатывающие только конденсационную электроэнергию, при раздельном энергопроизводстве. Поэтому правильный выбор параметров и структуры проектируемых теплоэлектрических станций как районных, т. е. работающих в составе районных энергоснабжающих систем, так и местных, в частности — промышленных, имеет большое значение для народного хозяйства.

К основным параметрам ТЭЦ относятся: графики электрических и тепловых нагрузок станции; качественные параметры тепловых нагрузок ТЭЦ (давление и температура соответствующих энергоносителей); начальные параметры рабочего тела (p_0 , атм, t °С) перед турбинами или другими тепловыми двигателями ТЭЦ и конечное давление рабочего тела при выходе из таких двигателей; число и номинальная мощность генераторных агрегатов, число и номинальная паропроизводительность котельных агрегатов, установленная мощность ТЭЦ в целом.

Структура ТЭЦ определяется в основном: термодинамическим циклом станции, энергетическими типами генераторных агрегатов, максимальной теплофикационной и конденсационной мощностью отдельных агрегатов и ТЭЦ в целом, годовым отпуском теплофикационной и конденсационной электроэнергии, энергетическими типами котельных агрегатов, основными энергетическими схемами ТЭЦ (тепловой и электрической) и полным к. п. д. станции.

Современное проектирование ТЭЦ еще имеет ряд недостатков, к наиболее существенным из которых относятся нижеследующие.

1. Неправильное, во многих случаях, определение основных параметров ТЭЦ, в частности графиков электрических и тепловых нагрузок, а также качественных параметров теплоносителей, вследствие:

а) недостаточно обоснованного выбора энергоносителей потребления (электроэнергия, сжатый воздух, пар, горячая вода, горючие газы) и их параметров;

б) недостаточного использования или, во многих случаях, отсутствия использования вторичных энергетических ресурсов промышленных и других потребителей, т. е. отходящего тепла, получаемого в результате энергетического обслуживания соответствующих процессов (отработавшего производственного пара, горячих отходящих газов промышленных печей, нагретой охлаждающей воды производственных агрегатов и т. д.);

в) недостаточного применения или, в подавляющем большинстве случаев, отсутствия применения тепловых энергопреобразовывающих установок, в виде тепловых трансформаторов и насосов, служащих, соответственно, для повышения давления пара или же для повышения температуры теплоносителей за счет использования вторичных энергоресурсов и других местных низкотемпературных источников тепла (воды рек и озер, окружающего воздуха).

2. Недостаточно правильное определение, во многих случаях, структуры ТЭЦ, обусловливаемое:

а) неправильным разделением суточных графиков электрических нагрузок энергоснабжающей системы между электростанциями системы, вследствие чего необоснованно завышаются выработка конденсационной электроэнергии на ТЭЦ и величина конденсационного хвоста ТЭЦ, т. е. максимальная конденсационная мощность, которую может развивать ТЭЦ при конденсационном режиме работы ее агрегатов, — без внешних тепловых нагрузок;

б) неправильным выбором энергетических типов турбин (теплофикационные турбины с противодавлением до сих пор почти не применяются) и котельных агрегатов ТЭЦ, без учета возможности работы последних на многих промышленных ТЭЦ, на отходящих горячих газах промышленных печей, а не на топливе.

Это приводит в ряде случаев к завышению установленной мощности ТЭЦ, усложнению типов теплофикационных турбин и излишним первоначальным затратам на ТЭЦ, а также к снижению экономичности работы последних.

Таким образом, при современном проектировании ТЭЦ, во многих случаях недоучитывается необходимость комплексного выбора оптимальных параметров и структуры ТЭЦ, при котором определение параметров и структура теплоэлектрических станций непосредственно взаимно связаны со структурой энергопотребления и схемой энергоснабжения энергопотребляющего района (или рассматриваемого отдельного объекта), с одной стороны, и с графиками нагрузок и структурой энергоснабжающей системы, с другой стороны.

При таком комплексном характере данной проблемы в каждом частном случае возможно несколько вариантов ее решения, из которых необходимо выбирать наиболее рациональный.

В настоящей статье дается в первом приближении основная схема предлагаемой автором методики выбора оптимальных параметров и структуры проектируемых ТЭЦ. При этом охарактеризованы также исходные методы, предлагаемые нами для составления и энергетического сопоставления вариантов решений как проблемы в целом, так и отдельных ее частей.

II. Исходные методы

А. Метод комплексного рассмотрения

Метод комплексного рассмотрения заключается в следующем:

1. Для объекта рассмотрения, по каждому из вариантов устанавливаются исходные, а также зависящие от него --- обратно-связанные с ним факторы.

2. Определяются максимальные возможные изменения величины количественных параметров рассматриваемого объекта в зависимости от изменений в возможных пределах соответствующих факторов.

3. Определяются погрешности (ошибки), получаемые при вычислении количественных параметров рассматриваемого объекта в функции от количественных параметров соответствующих факторов и вызываемые условными допущениями в определении исходных данных, неточностями в методах расчетов, измерений, построений и т. д.

4. Рассмотрению подлежат только такие факторы, для которых обуславливаемые ими погрешности в определении количественных параметров объекта рассмотрения меньше максимальных возможных изменений количественных параметров последнего.

5. После отбора подлежащих рассмотрению факторов, в первую очередь рассматриваются, совместно с объектом, исходные факторы. Затем определяются значения количественных параметров обратно-связанных факторов и производится соответствующее уточнение количественных параметров объекта, причем подобное уточнение прекращается после того, как оно перестает влиять на выбор варианта объекта.

На рис. 1 показана примерная комплексная связь ТЭЦ с исходными факторами --- энергетическими нагрузками потребителей энергии и зависимым обратно-связанным фактором --- энергоснабжающей системой.

Исходные факторы в виде тепловых нагрузок потребителей энергии определяют (прямая связь на рис. 1) теплофикационную мощ-

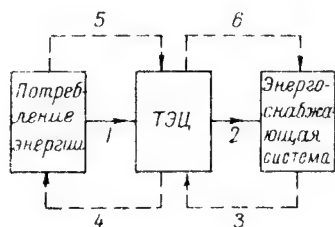


Рис. 1. Комплексная связь ТЭЦ с потреблением энергии и энергоснабжающей системой

ность и энергию проектируемой ТЭЦ, участвующей (прямая связь 2) в покрытии графиков электрических нагрузок энергоснабжающей системы. Такое покрытие графиков нагрузок определяет, в свою очередь (обратная связь 3), необходимый конденсационный хвост ТЭЦ и его использование. Уточненное таким путем основное энергооборудование ТЭЦ оказывает влияние на покрытие графиков нагрузок рассматриваемых потребителей, на использование их вторичных энергоресурсов и т. д. (обратная связь 4).

Эти коррективы количественных параметров исходных факторов, в свою очередь, влияют на параметры энергетических нагрузок ТЭЦ (уточненная прямая связь 5), что, далее, влияет на участие тепло-электрической станции в покрытии графиков нагрузок энергоснабжающей системы и, следовательно, на структуру последней (уточненная прямая связь 6).

Б. Метод энерго-экономических критериев

Для сопоставления вариантов и выбора оптимального из них нами предложен метод энерго-экономических критериев, устанавливающий энергетические и экономические критерии, необходимые для такого сопоставления и выбора вариантов.

Выбор оптимального варианта должен производиться по минимуму суммарных фактических затрат, необходимых для получения заданного народнохозяйственного эффекта за расчетный период по каждому из рассматриваемых вариантов.

Предлагаются следующие критерии:

1) Энергетические критерии, определяющие:

- а) одинаковый энергетический эффект для всех рассматриваемых вариантов, т. е. одинаковое обеспечение качественных и количественных параметров обслуживаемых процессов,
- б) одинаковую степень надежности энергетического обслуживания последних.

2) Экономические критерии, определяющие:

- а) суммарные фактические невозвратимые затраты по каждому из рассматриваемых вариантов, т. е. экономическую характеристику рассматриваемого энергетического объекта,
- б) срок выравнивания суммарных фактических невозвратимых затрат по сравниваемым вариантам.

Экономическая характеристика энергетического объекта за расчетный период по тому или другому из рассматриваемых вариантов предлагается нами в следующем виде:

$$\begin{aligned} Z_{t_{расч}} &= K_o + \sum_{t=1}^{t=t_{расч}} I_{a, t} + \sum_{t=1}^{t=t_{расч}} I_{np, t} = \\ &= \sum_{t=0}^{t=t_{расч}} K_{нев} + I_{np, ср} \cdot t_{расч}, \end{aligned}$$

где

K_o — невозвратимые предварительные затраты, произведенные до начала строительного периода, а также расходы на монтаж оборудования объекта;

$I_{a. t}$ — годовые амортизационные отчисления за год;

$I_{np. t}$ — прямые эксплуатационные расходы за год;

$K_{нев}$ — невозвратимые первоначальные затраты;

$I_{np. ср.}$ — средние прямые годовые расходы за расчетный период.

Величину расчетного периода $t_{расч.}$, за который определяется экономическая характеристика сравниваемых вариантов, целесообразно принимать применительно к следующим условиям:

$$t_{a. ф} \geq t_{расч} \geq t_{a. м},$$

где:

$t_{a. ф}$ — срок средневзвешенной физической амортизации установок в сопоставленных вариантах;

$t_{a. м.}$ — срок моральной амортизации установок.

Предлагаемый метод энерго-экономических критериев заключается в следующем:

1) Для каждого из вариантов рассматриваемого энергетического объекта, составляемых при помощи метода комплексного рассмотрения и обеспечивающих получение одинакового заданного народно-хозяйственного эффекта, определяются энергетические критерии.

2) По полученным энергетическим критериям для каждого варианта определяется соответствующий экономический критерий, а именно экономическая характеристика рассматриваемого энергетического объекта.

При составлении экономической характеристики следует учитывать принятую очередность во времени производства первоначальных затрат и очередность пуска в эксплуатацию отдельных конструктивных элементов или частей объекта.

3) При сопоставлении вариантов энергетического объекта сравниваются соответствующие экономические характеристики вариантов объекта и определяется промежуток времени, в конце которого сравниваемые варианты имеют равные значения, т. е. срок выравнивания суммарных фактических невозвратимых затрат.

Для выбора варианта (I) с более значительными первоначальными затратами необходимо, чтобы для промежутка времени $t_0 \leq t_{расч}$ имело место равенство значений экономических характеристик рассматриваемых вариантов (I и II), т. е.:

$$t_0 = \frac{\sum_{t=0}^{t=t_0} K_{невI} I_t - \sum_{t=0}^{t=t_0} K_{невII} I_t}{I_{np. ср. II}^{(t_0)} - I_{np. ср. I}^{(t_0)}}.$$

При этом приближенно можно принимать:

$$I_{np. cp II}^{(t_a)} - I_{np. cp I}^{(t_a)} = I_{np. cp II} - I_{np. cp I},$$

рассматривая установившийся режим использования данного энергетического объекта, что и имеет место в подавляющем большинстве случаев.

Во многих случаях задается предельный допустимый срок окупаемости превышения первоначальных затрат по одному из сравниваемых вариантов за счет соответствующей экономии в годовых расходах по этому варианту ($t_{ок. д}$). В таких случаях по предлагаемой методике определяется предельный допустимый срок выравнивания суммарных невозвратимых затрат, включающих полные первоначальные затраты, по сравниваемым вариантам (t'_a)

$$t'_a = \frac{K_I - K'_{II}}{I_{np. cp II} - I_{np. cp I}} = \frac{(K_{oI} + K_{нев I}) - (K_{oII} + K'_{нев II})}{I_{np. cp II} - I_{np. cp I}},$$

где: K_I и K'_{II} — полные первоначальные затраты, соответственно, по вариантам I и II,

$$K_{нев I} = I_{aI} \cdot t_{aI}, \text{ причем } t_{aI} = t_{ок. д}$$

$$K'_{нев II} = K_{нев II} \frac{t_{aI}}{t_{aII}} = I_{aII} \cdot t_{aII} \frac{t_{aI}}{t_{aII}} = I_{aII} t_{aI},$$

если

$$t_{aII} \neq t_{aI}.$$

Окончательный выбор варианта, для которого $t'_a \leq t_{ок. д}$, должен производиться с учетом степени удовлетворения последним добавочных требований народного хозяйства в отношении оборонных условий, здравоохранения, структуры материальных затрат, сроков сооружения и других.

Экономические критерии, предлагаемые некоторыми авторами для сравнения первоначальных затрат (капиталовложений) и эксплуатационных расходов под названием „срока окупаемости“, „срока расширенного воспроизводства“, „срока возобновления затрат“ и т. д., содержат обычно в числителе не суммарные первоначальные невозвратимые затраты, а суммарные полные первоначальные затраты без учета разной длительности соответствующих амортизационных сроков. При этом большинство авторов в знаменателе выражения, определяющего такой критерий, помещают не разность ежегодных прямых эксплуатационных расходов, а разность полных ежегодных расходов, включая и соответствующие амортизационные отчисления, что завышает величину данного экономического критерия, т. е. срока окупаемости.

Для обеспечения дальнейшего роста и совершенствования социалистического производства на базе высшей техники в сравниваемых вариантах должны предусматриваться амортизационные отчисления

одинаковой величины, т. е. последние не должны фигурировать в знаменателе данного экономического критерия. Поэтому в ряде случаев пользование применяемыми до настоящего времени экономическими критериями не может привести к выбору оптимального варианта.

III. Основная схема предлагаемой методики

Основную схему предлагаемой методики определения оптимальных параметров и структуры проектируемых ТЭЦ характеризуют нижеперечисленные, последовательно выполняемые этапы решения проблемы:

1. Составление вариантов потребностей района (или отдельного энергопотребляющего объекта) в основных видах энергии с разными из возможных вариантных энергоносителей потребления с минимально допустимыми качественными параметрами, т. е. такими, применение которых не снижает качественных или количественных параметров обслуживаемых процессов.

2. Определение для каждого из вариантов энергоносителей потребления наиболее целесообразного варианта использования вторичных энергетических ресурсов, для соответствующего покрытия электрических и тепловых нагрузок.

3. Определение для каждого из вариантов энергоносителей потребления наиболее целесообразного варианта применения тепловых энергопреобразовывающих установок для одновременного получения наиболее рациональных видов и параметров энергоносителей потребления и производства энергии и для использования местных низкотемпературных источников тепла.

4. Составление для каждого из вариантов энергоносителей потребления энергетических балансов (по мощности и энергии) и соответствующих вариантов схемы энергоснабжения рассматриваемого объекта и выбор затем основной схемы энергоснабжения и оптимальных энергоносителей потребления.

5. Определение графиков суммарной электрической нагрузки проектируемых ТЭЦ на основе покрытия полученных графиков нагрузки при помощи проектируемой ТЭЦ и электростанций энергоснабжающей системы, в частности, — определение размеров и режимов выработки конденсационной электроэнергии на ТЭЦ.

6. Определение, как результат покрытия графиков нагрузки, основной структуры энергоснабжающей системы, характеризуемой мощностями входящих в ее состав основных групп электростанций, — для случаев, когда проектируемая ТЭЦ является районной.

7. Установление числа отдельных ТЭЦ и графиков их нагрузок.

8. Выбор энергетических типов и параметров турбогенераторных и котельных агрегатов ТЭЦ, на основе сопоставления вариантов энерго-экономической характеристики теплоэлектрической станции.

9. Выбор основных энергетических схем (тепловой и электрической) ТЭЦ.

10. Уточнение полученных решений при наличии значительного расхождения энерго-экономических показателей ТЭЦ со значениями показателей, принятыми при первоначальном выборе схемы энерго-снабжения района (или отдельного энергопотребляющего объекта).

В других работах, посвященных рассмотрению данной проблемы, а также при проектировании ТЭЦ проектными организациями, например, Теплоэлектропроектом и Промэнергопроектом, большая часть перечисленных выше вопросов не рассматривается (пп. 3, 4, 5, 6, 7, 10). Остальные вопросы рассматриваются только частично, односторонне.

Так, по п. 1 не рассматриваются возможные варианты энерго-носителей потребления. По п. 2 использование вторичных энергетических ресурсов рассматривается, притом частично, только для некоторых более крупных промышленных предприятий, причем комбинированное энергопроизводство на базе вторичных энергоресурсов не применяется.

По п. 8 — выбор энергетических типов турбогенераторных агрегатов ограничивается в основном агрегатами с одним или двумя регулируемыми отборами пара и с конденсацией. В качестве редких исключений в последние годы начинают применяться также агрегаты с турбинами с противодавлением. Агрегаты же с турбинами с противодавлением и регулируемым отбором пара или с турбинами ухудшенного вакуума до сих пор вообще не рассматриваются.

По п. 9 — выбор и расчет тепловой схемы, составляемой без необходимого использования вторичных энергоресурсов и без применения тепловых энергопреобразовывающих установок, в ряде случаев не может быть признан достаточно правильным.

Во многих случаях применение практикуемой методики проектирования ТЭЦ не может привести к выбору оптимальных параметров и структуры проектируемых ТЭЦ.

IV. Характеристика отдельных этапов решения проблемы

А. Использование вторичных энергоресурсов

Несмотря на огромное значение для народного хозяйства возможно более полного использования для целей энергоснабжения вторичных энергетических ресурсов промышленных предприятий, что уменьшает первоначальные затраты на энергоснабжение и дает значительную экономию топлива, такие вторичные энергоресурсы используются до настоящего времени в далеко недостаточной мере.

К наиболее значительным вторичным энергоресурсам промышленных предприятий следует отнести, в первую очередь, отходящие горячие газы промышленных печей (в металлургических, машиностроительных, химических и других предприятиях). Потеря тепла с отходящими газами составляет в среднем не менее 25—30% от количества тепла в сжигаемом топливе. Температура отходящих из промышленных печей газов составляет не менее 450—600 °С.

Наиболее целесообразно, по нашему мнению, использовать тепло отходящих горячих газов промышленных печей в паровых котлах — утилизаторах, устанавливаемых на местных ТЭЦ с турбинами с противодавлением или с регулируемыми отборами пара и с конденсацией (рис. 2). Тем не менее, до настоящего времени такое использование тепла отходящих горячих газов промышленных печей для комбинированного энергопроизводства на ТЭЦ еще не применяется.

На рис. 2 показана принципиальная тепловая схема такой ТЭЦ, на которой установлены паровые котлы-утилизаторы 1 и генераторные агрегаты с турбинами с противодавлением 2, если по

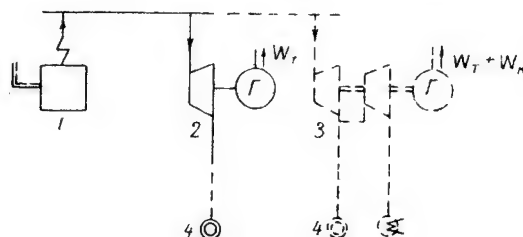


Рис. 2. Схемы оптимального использования тепла отходящих печных газов на ТЭЦ с котлами-утилизаторами

режимам и размерам тепловых нагрузок такой ТЭЦ возможно полностью израсходовать весь пар, получаемый в котлах-утилизаторах, на покрытие таких нагрузок при комбинированном энергопроизводстве. В противном случае целесообразно устанавливать вместо агрегатов с турбинами с противодавлением, или дополнительно к последним, агрегаты с турбинами с регулируемым отбором пара и с конденсацией 3 или же агрегаты с конденсационными турбинами, например, с турбинами мягкого пара. Цифрой 4 на рис. 2 обозначены теплоприемники.

Достаточно значительным по величине вторичным энергоресурсом в машиностроительных и других предприятиях является также отработавший производственный пар из агрегатов пластической обработки металлов (паровых молотов, ковочных машин, прессов), имеющий давление порядка 1,2—1,3 атм и составляющий, в среднем, 85—90% от соответствующего количества производственного пара.

В первую очередь отработавший производственный пар должен использоваться для тех или других нагревательных целей, т. е. для покрытия отопительно-вентиляционной и бытовой тепловых нагрузок, если таковые имеются. Такое использование отработавшего производственного пара дает большую экономию топлива на энергоснабжение предприятий, чем использование этого пара только для выработки электроэнергии в специальных, например, турбогенераторных агрегатах с конденсационными турбинами мягкого пара, или в турбинах генераторных агрегатов местной ТЭЦ.

Только неиспользованный для нагревательных целей, отработавший производственный пар должен быть использован, например, в не-отопительный период года для производства электроэнергии.

Б. Применение тепловых энергопреобразовывающих установок

Применение тепловых трансформаторов, повышающих давление пара, наиболее целесообразно для замены редукционно-охладительных установок на ТЭЦ, работающих на свежем паре из котельной и покрывающих часть тепловых нагрузок ТЭЦ постоянно — в течение года (рис. 3, а). В таких случаях тепловые трансформаторы 2 (рис. 3, б) дают возможность тепловую нагрузку, покрываемую до их установки редукционно-охладительными установками 1, покрыть

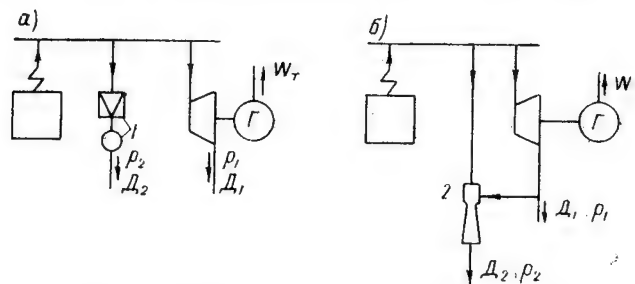


Рис. 3. Варианты теплоснабжения от ТЭЦ:

а) при помощи РОУ;
б) посредством тепловых трансформаторов

за счет пара, отбираемого из теплофикационных турбин ТЭЦ, причем давление этого пара p_1 повышается в тепловых трансформаторах до требуемой тепловыми потребителями величины p_2 . Таким образом, тепловые трансформаторы увеличивают количество теплофикационной электроэнергии, вырабатываемой на ТЭЦ на базе тепловых нагрузок.

Применение тепловых трансформаторов в ряде случаев дает возможность применять на новых ТЭЦ более простые и, следовательно, более дешевые теплофикационные турбины. Кроме того, расположение тепловых трансформаторов на приемном конце тепловой сети, непосредственно у тепловых потребителей, целесообразно в ряде случаев, упрощает и удешевляет тепловую сеть.

Наиболее перспективным представляется применение тепловых трансформаторов на промышленных ТЭЦ, имеющих несколько паровых нагрузок при разных давлениях пара.

В то же время применение тепловых трансформаторов требует добавочных первоначальных затрат, а также эксплуатационных расходов. Поэтому рациональность применения тепловых трансформаторов должна быть в каждом отдельном случае экономически обоснована.

Применение тепловых насосов, служащих для повышения температуры используемых теплоносителей, наиболее рационально в установках, служащих для создания искусственного климата в течение всего года, а также для отопительно-вентиляционного и бытового теплоснабжения таких потребителей, у которых имеются соответствующие низкотемпературные источники тепла и для которых применение централизованного теплоснабжения от ТЭЦ по местным условиям нецелесообразно.

Применение тепловых насосов целесообразно также для использования низкотемпературных энергоресурсов в виде нагретой воды, охлаждающей промышленные печи, сливной бытовой воды и загрязненного конденсата промышленного теплопотребления, а также вторичного производственного пара, получаемого в процессе дистилляции жидкостей, выпаривания растворов и т. д.

В ряде случаев может оказаться рациональным применение тепловых насосов для использования нагретой охлаждающей воды конденсационных турбин тепловых электростанций.

Тепловые насосы, заменяющие собою ТЭЦ или теплоснабжающие котельные в части покрытия соответствующих тепловых нагрузок, могут дать значительную экономию топлива сравнительно с другими способами теплоснабжения. Однако применение тепловых насосов требует значительных первоначальных затрат и эксплуатационных расходов, а также уменьшает выработку теплофикационной электроэнергии на ТЭЦ, если тепловая нагрузка, покрываемая тепловыми насосами, может быть также покрыта турбинами ТЭЦ. Поэтому применение тепловых насосов должно быть в каждом случае экономически обосновано.

При решении вопроса о применении тепловых насосов следует, наряду с экономическими показателями, учитывать производственные и санитарно-гигиенические требования обслуживаемых потребителей, а также условия эксплуатации, в отношении которых тепловые насосы, с их простым и легко автоматизируемым обслуживанием, имеют существенные преимущества перед вариантными способами теплоснабжения.

В. Составление энергетических балансов

Расходную и приходную части энергобалансов по мощности и энергии необходимо составлять франко энергетические вводы потребителей.

Расходная и приходная части энергетического баланса по мощности составляются за характерные зимние и летние рабочие сутки.

Расходная и приходная части энергобаланса по энергии составляются за год, соответствующий заданному уровню развития рассматриваемого объекта.

Расходная часть энергобалансов по мощности и по энергии:

$$E_{расх. т} = E_{номр. т} + E_{потери т.}$$

где:

$E_{\text{потр. } t}$ — расход энергии данного вида за промежуток времени t ;
 $E_{\text{потери } t}$ — потери энергии во внутрипотребительских сетях и внутрипотребительских энергопреобразовывающих установках за промежуток времени t .

Приходная часть энергобаланса:

$$E_{\text{прих. } t} = E_{\text{вт. п. } t} + E_{\text{перв. п. } t} = E_{\text{ц. } t} + E_{\text{дец. } t},$$

где:

$E_{\text{прих. } t}$ — отпуск энергии данного вида;
 $E_{\text{вт. п. } t}$ — количество энергии, отпускаемой за счет использования вторичных энергетических ресурсов;
 $E_{\text{перв. п. } t}$ — количество энергии, отпускаемое за счет использования первичных энергоресурсов;
 $E_{\text{ц. } t}$ — количество энергии, получаемое путем централизованного энергоснабжения;
 $E_{\text{дец. } t}$ — количество энергии, получаемое от изолированных местных установок, т. е. децентрализованным путем.

При этом:

$$E_{\text{вт. п. } t} = E_{\text{вт. п. эн } t} + E'_{\text{вт. п. } t}$$

и

$$E_{\text{перв. п. } t} = E_{\text{перв. п. эн } t} + E'_{\text{перв. п. } t},$$

где индекс *эн* указывает, что соответствующее энергоснабжение производится при помощи тепловых энергопреобразовывающих установок.

Для каждого из вариантов энергетических балансов по энергии определяется значение предлагаемого нами коэффициента рациональности использования топлива для энергоснабжения района (или отдельного объекта), представляющего собою коэффициент полезного действия суммарного энергоснабжения за счет топлива

$$K_{\text{р. и. м}} = \frac{Q_{\text{т}} - Q_2 + (W - W_2) 860}{Q_{\text{топ}}},$$

где:

$Q_{\text{т}}$ — общий расход тепла для средне и низкотемпературных процессов ($t \leq 300^\circ \text{C}$), *ккал*;
 Q_2 — частичное покрытие $Q_{\text{т}}$ за счет гидроэлектроэнергии, *ккал*;
 W — общий расход электроэнергии, *квтч*;
 W_2 — частичное покрытие W за счет гидроэлектроэнергии, *квтч*;
 $Q_{\text{топ}}$ — суммарный расход тепла в топливе для энергоснабжения, *ккал*.

Коэффициент рациональности использования топлива тем выше, чем значительнее используются вторичные энергоресурсы потребителей энергии для покрытия энергетических нагрузок последних.

На основе вариантов энергетических балансов составляются соответствующие варианты схемы энергоснабжения. Сопоставление

таких вариантов схемы энергоснабжения при помощи метода энерго-экономических критериев дает возможность выбрать наиболее рациональный вариант схемы энергоснабжения, причем расходная часть соответствующего варианта энергобаланса определяет оптимальные энергоносители потребления.

Г. Определение графиков электрической нагрузки ТЭЦ

При проектировании районной ТЭЦ характерные суточные графики активной электрической нагрузки энергоснабжающей системы строятся применительно к центральным распределительным пунктам системы. При проектировании промышленных ТЭЦ такие графики

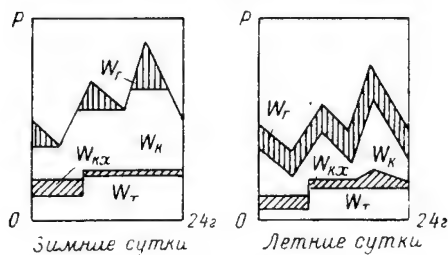


Рис. 4. Определение суммарных графиков электрической нагрузки ТЭЦ.

должны строиться на энергетических вводах потребителей. Покрытие таких графиков электрических нагрузок основными группами электростанций энергоснабжающей системы и проектируемых ТЭЦ должно производиться в соответствии с рис. 4, а именно, в нижней части графиков должна располагаться теплофикационная электроэнергия ТЭЦ (W_t), в верхней части графиков — электроэнергия, вырабатываемая на ГЭС (W_g). Остающиеся непокрытыми средние части суточных графиков нагрузки должны покрываться за счет конденсационной электроэнергии, вырабатываемой на КЭС (W_k), а также вырабатываемой конденсационными хвостами ТЭЦ ($W_{k.x}$).

Покрытие графиков нагрузок энергоснабжающей системы определяет суммарные графики электрической нагрузки проектируемых ТЭЦ, а также величину необходимого суммарного конденсационного хвоста ТЭЦ.

Д. Выбор энергетических типов и параметров турбогенераторных агрегатов ТЭЦ

После определения графиков энергетических нагрузок проектируемой ТЭЦ выбираются энергетические типы и параметры турбогенераторных агрегатов ТЭЦ.

Энергетические типы турбогенераторных агрегатов характеризуют последние в отношении покрытия ими графиков электрической и тепловой нагрузок ТЭЦ.

В большинстве случаев необходимая величина конденсационного хвоста теплофикационных агрегатов типов КО и КОО на современных ТЭЦ значительно меньше максимальной вынужденной мощности турбоагрегатов, причем именно последняя должна соответствовать

номинальной мощности турбоагрегата:

$$P_{\text{вын. макс}} = P_{\text{т. макс}} + P_{\text{к. мин}} \approx P_n,$$

где:

$P_{\text{т. макс}}$ — максимальная теплофикационная мощность турбоагрегата, развиваемая при максимальном отпуске пара агрегатом;

$P_{\text{к. мин}}$ — минимальная конденсационная мощность, развиваемая при таком режиме теплофикационным агрегатом за счет минимального пропуска пара в конденсатор турбины для устранения „сухого хода“ конденсатора.

Во многих случаях целесообразно устанавливать на современных ТЭЦ теплофикационные турбоагрегаты с конденсационными хвостами $P_{\text{к. в.}} < P_n$. Тем не менее советская энергомашиностроительная промышленность изготавливает до настоящего времени теплофикационные агрегаты типов КО и КОО только с конденсационными хвостами $P_{\text{к. в.}} = P_n$.

Для покрытия тепловых производственных нагрузок наиболее рационально, во многих случаях, применение турбогенераторных агрегатов с турбинами с противодавлением.

Окончательный выбор энергетических типов и параметров основных агрегатов ТЭЦ целесообразно производить при помощи энергетических характеристик ТЭЦ, определяющих для того или другого варианта энергооборудования станции полный годовой расход условного топлива станцией, необходимый для покрытия заданных годовых графиков средних месячных тепловых и электрических нагрузок ТЭЦ.

Практическое применение предлагаемой методики в условиях проектирования ТЭЦ может дать значительный экономический эффект.

V. Примерное сопоставление двух вариантов проектирования ТЭЦ:

- а) по практикуемой до настоящего времени методике
- и б) по методике, предлагаемой в статье

Исходные данные.

1. Максимальный часовой расход пара на производственные механические цели (для кузнечного цеха) 150 т/час при 10 ата. Соответствующий средний расход пара за рабочее время 135 т/час. Годовая продолжительность данной нагрузки 307 суток, по 21 час. в каждые сутки. Отработавший производственный пар из молотовых агрегатов имеет давление 1,3 ата и составляет около 90% от соответствующих количеств производственного пара.

2. Максимальный часовой расход тепла на отопительно-вентиляционные и бытовые цели составляет, при расчетной температуре наружного воздуха (-30°C), 70 мккал/час. Соответствующий средний часовой расход тепла за отопительный период, длительностью 5000 час/год, составляет 35 мккал/час. Продолжительность

отопительного периода 5000 час. Максимальная температура сетевой воды в прямой магистрали 130°C , в обратной 70°C .

3. Расход пара на производственные нагревательные цели составляет около 30 т/час при 4 атм в течение 307 рабочих суток, круглосуточно.

4. Электрические нагрузки ТЭЦ не заданы, так как обслуживаемое этой станцией промышленное предприятие может вообще полностью снабжаться электроэнергией от районной энергосистемы.

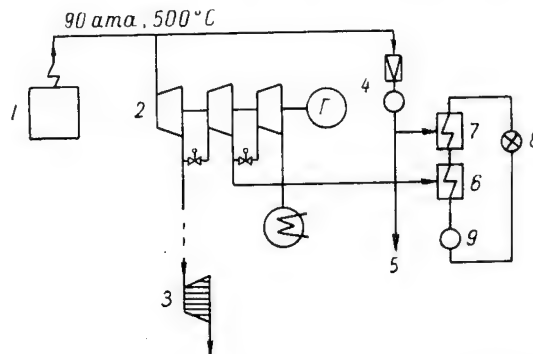


Рис. 5. Принципиальная тепловая схема ТЭЦ по варианту *а* (частичная)

1 — котельные агрегаты ($4 \times 120 \text{ т/час}$); 2 — турбогенераторные агрегаты ($2 \times \text{ВПТ-25}$); 3 — молотовые агрегаты; 4 — редукционно-охладительная установка; 5 — отпуск пара на производственные нагревательные цели; 6 — основные сетевые подогреватели; 7 — пиковые сетевые подогреватели; 8 — отопительно-вентиляционные и бытовые теплоприемники; 9 — сетевые насосы

На рис. 5 и 6 показаны принципиальные тепловые схемы двух упомянутых выше проектных вариантов.

В варианте *а* (рис. 5), в отличие от варианта *б* (рис. 6):

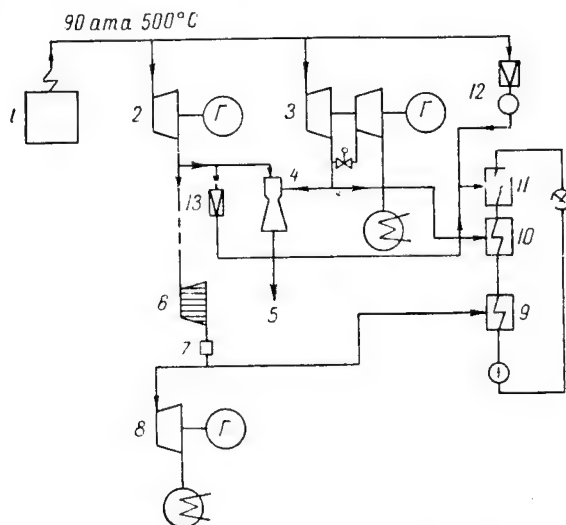
1) вторичные энергоресурсы в виде отработавшего производственного пара вообще не используются;

2) паровая нагрузка для производственных нагревательных цепей покрывается свежим паром из котельных агрегатов через редукционно-охладительную установку, а не тепловыми трансформаторами, как в варианте *б*;

3) на ТЭЦ устанавливаются два турбогенераторные агрегата с турбинами наиболее сложного энергетического типа КОО, т. е. с двумя регулируемыми отборами пара и с конденсацией, тогда как в варианте *б* устанавливается агрегат с турбиной типа П, т. е. с противодавлением, и агрегат с турбиной типа КО, т. е. с одним регулируемым отбором пара и конденсацией;

4) пиковый сетевой подогреватель питается только свежим паром через РОУ, тогда как в варианте *б* питание этого подогревателя производится паром из турбины П через редукторы и только в незначительной части свежим паром через РОУ;

В варианте б (рис. 6) отработавший производственный пар используется в первую очередь для питания сетевых подогревателей 9, из которых нагретая сетевая вода поступает далее в основные сетевые подогреватели ТЭЦ.



1 — котельные агрегаты (3 × 120 м/час); 2 — турбогенераторный агрегат (1 × ВР-25); 3 — турбогенераторный агрегат (1 × ВР-12); 4 — тепловая трансформатор 30 м/час при 4 ата; 5 — отпуская пара для производственных нагревательных целей; 6 — молотковые агрегаты; 7 — очиститель отработавшего пара; 8 — турбогенераторный агрегат (1 × МК-12); 9 — сетевые подогреватели на отработавшем производственном паре; 10 — основные сетевые подогреватели; 11 — пиковые сетевые подогреватели; 12 — редукционно-охладительная установка; 13 — редуктор

Характеристика энергетического оборудования ТЭЦ, принимаемого в сравниваемых вариантах *а* и *б*, дана в табл. 1.

261

Таблица 1

Характеристика энергетического оборудования ТЭЦ

Энергооборудование ТЭЦ	Проектные варианты	
	<i>а</i>	<i>б</i>
Котельные агрегаты	$4 \times 120 \text{ т/час}$	$3 \times 120 \text{ т/час}$
Турбогенераторные агрегаты	2 агрегата по 25 <i>мгвт</i> с турбинами КОО (ВГТ-25)	1 агрегат — 25 <i>мгвт</i> с турбиной П (ВР-25); 1 агрегат 12 <i>мгвт</i> с турбиной КО (ВТ-12); 1 агрегат с турбиной МК 12 <i>мгвт</i> (МК-12)
Рабочая редукционно-охладительная установка (РОУ)	РОУ производительностью 70 <i>т/час</i> (90/4 <i>ата</i>)	—
Тепловой трансформатор	—	Пароструйный тепловой трансформатор, производительностью 30 <i>т/час</i> при 4 <i>ата</i> ($P_p = 10 \text{ ата}$, $P_n = 2 \text{ ата}$)

Таблица 2

Технико-экономическое сопоставление вариантов *а* и *б*

Технико-экономические показатели	Проектные варианты	
	<i>а</i>	<i>б</i>
Суммарные первоначальные затраты на ТЭЦ	$K_{с. а}$	$K_{с. б} < 0,8 K_{с. а}$
Суммарные ежегодные расходы	$H_{с. а}$	$H_{с. б} < 0,8 H_{с. а}$
Годовая экономия условного топлива за счет:		
1) использования обрабатываемого производственного пара	—	45 000
2) за счет увеличения выработки теплофикационной электроэнергии при наличии теплового трансформатора	—	8 000
Суммарная годовая экономия	—	53 000

Примечание: $K_{с. а}$ — суммарные первоначальные затраты по варианту *а*,
 $H_{с. а}$ — суммарные ежегодные расходы по варианту *а*.

Выбор оптимальных энергоносителей потребления, уже заданных в исходных данных, является в этом расчетном примере излишним.

В табл. 1 приведен только наиболее рациональный из ряда вариантов *б*, сопоставление которых в условиях данной статьи отпадает.

В табл. 2 дано технико-экономическое сопоставление рассматриваемых вариантов *а* и *б*. При этом условно опущен целый ряд факторов, еще более повышающих относительную экономичность варианта *б* сравнительно с вариантом *а*: экономия топлива за счет работы пикового сетевого подогревателя в основном не на свежем паре из котельных агрегатов, а на паре, отбираемом из теплофикационной турбины ВР-25, значительное увеличение расходов топлива на выработку конденсационной электроэнергии на ТЭЦ в варианте *а*, в летнее время, когда резко уменьшается паровая нагрузка турбин КОО и др.

Сопоставление обоих вариантов *а* и *б* в табл. 2 показывает несомненное технико-экономическое превосходство варианта *б*, составленного по методике, предложенной автором статьи, перед вариантом *а*, составленным по практикуемой до сих пор методике.

Вариант *б* требует значительно меньших суммарных первоначальных затрат, а также значительно меньших суммарных ежегодных расходов, чем вариант *а*, давая при этом значительную ежегодную экономию топлива.

Такой эффект при применении предлагаемой в данной статье методики обуславливается, как показывают расчетные примеры, экономией в первоначальных затратах, вследствие уменьшения мощности отдельных электростанций и энергоснабжающей системы в целом и экономией в суммарных расходах топлива на энергоснабжение района или отдельного энергопотребляющего объекта. Это достигается путем рационального использования вторичных энергетических ресурсов и применения тепловых энергопреобразовывающих установок, надлежащего выбора основной схемы энергоснабжения и графиков электрической и тепловой нагрузок проектируемой ТЭЦ и правильного выбора энергетических типов и параметров основных агрегатов станции, а также параметров и структуры ТЭЦ в целом.

Поступила в декабре 1955 г.

Инж. С. И. МЯГКОВА

**ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ
С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ТРЕХФАЗНОГО
АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ
ОДИНОЧНОЙ ЛИНИИ**

Введение

До сих пор электрическое торможение предлагалось как средство для повышения динамической устойчивости электрических передач и систем [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Однако имеются высказывания [3, 4], что оно может оказаться эффективным на одноцепных линиях электропередачи, причем позволяет применить трехфазное автоматическое повторное включение (ТАПВ). При этом такие факторы, как величина нагрузочного сопротивления, предназначенного для электрического торможения, оптимальный момент включения и отключения этого сопротивления, а также влияние параметров, характеризующих электропередачу, исследованы не были. Настоящая работа и ставит своей целью исследование возможности применения трехфазного автоматического повторного включения одиночной линии при осуществлении электрического торможения гидрогенераторов станции.

Гидрогенератор, вследствие своей относительно низкой инерции, имеет очень заметную тенденцию к значительному повышению скорости при коротких замыканиях и потерях нагрузки, сопровождающих короткие замыкания. Это повышение скорости особенно сильно проявляется в случае, когда гидростанция связана с системой одиночной линией. При отключении такой линии после возникновения короткого замыкания и при последующем ТАПВ угол расхождения роторов станции и системы, а также скорость относительного движения ротора станции могут оказаться значительными и станция не сможет удержаться в синхронизме с системой.

Опыт эксплуатации показывает, что большинство повреждений линий электропередачи — однофазные замыкания на землю, реже

бывают двухфазные короткие замыкания, еще реже — двухфазные короткие замыкания на землю и совсем редко — трехфазные короткие замыкания.

Следует отметить, что в случае однофазных замыканий на землю использование однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ) встречает ряд затруднений: устройство отдельного привода к каждой фазе, введение дополнительных органов — избирателей поврежденных фаз, усложнение релейной защиты всей энергосистемы и т. д. Кроме того, в случае неуспешного однофазного автоматического повторного включения длительная работа в неполнофазном режиме на одноцепной линии связи между станцией и системой все равно не применяется, из-за значительной несимметрии нагрузки на генераторах, и при устойчивом повреждении такая линия полностью отключается от системы. В связи с этим весьма желательно иметь для данной схемы простое и надежное устройство, действующее не только при однофазном замыкании, но и при любом другом виде повреждения. Как показали предварительные расчеты и последующие экспериментальные исследования на модели, электрическое торможение позволяет применить ТАПВ и сохранить тем самым синхронную работу станции с системой после неустойчивых повреждений при всех видах короткого замыкания. При этом соответствующим образом подобранное для электрического торможения активное сопротивление должно автоматически включаться при аварийном режиме. Следует отметить, что в случае применения ТАПВ никаких конструктивных изменений привода или защиты делать не приходится.

Принцип использования электрического торможения

Действие электрического торможения гидрогенераторов при трехфазном коротком замыкании, отключении линии и последующем ТАПВ проанализировано на схеме рис. 1, а, параметры отдельных элементов которой выбраны, исходя из условия передачи от станции мощности, равной натуральной мощности линии электропередачи. Из этой схемы видно, что в случае связи станции с системой посредством одиночной линии нагрузочное сопротивление, применяемое для электрического торможения в аварийных режимах, должно подключаться параллельно генератору — на шины генераторного напряжения или на шины высокого напряжения станции.

Последовательное сопротивление не может быть применено, так как после отключения линии генератор окажется без нагрузки. Нагрузочное сопротивление нормально отключено. Релейная защита подает импульс на включение сопротивления одновременно с подачей импульса на отключение линии при повреждении на ней.

Условия, создаваемые трехфазным коротким замыканием в начале линии при применении нагрузочного сопротивления величиной, равной 1,00, показаны на рис. 1, б (за базисные условия приняты натуральная мощность линии и ее номинальное напряжение).

Начальный угловой сдвиг при 100-процентной нагрузке равен $33^{\circ}10'$ (точка *a*).

Когда происходит короткое замыкание, отдаваемая мощность генератора уменьшается со 100% до 14% (точка *b*) из-за низкого коэффициента мощности в цепи тока повреждения.

Первичный двигатель продолжает развивать 100-процентный вращающий момент, поэтому ротор начинает ускоряться (кривая *bв*).

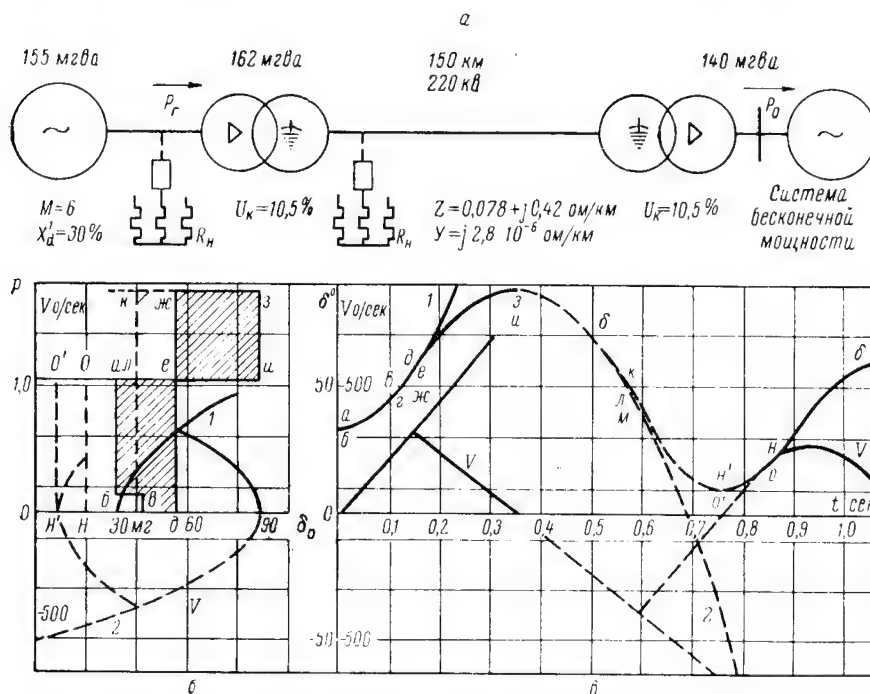


Рис. 1. Расчетная схема электропередачи и принцип применения нагрузочного сопротивления

В точке *в* происходит отключение короткого замыкания, причем линия отключается и связь с системой теряется (точка *г*). В промежутке *г—д* ротор ускоряется 100-процентным вращающим моментом. Если при этом не подключить нагрузочное сопротивление, то относительная скорость и угол очень быстро увеличиваются и после повторного включения станция не удержится в синхронизме (кривая *1*). В точке *д* происходит включение нагрузочного сопротивления, при этом в точке *ж* мощность, отдаваемая генератором, равна 167%, ротор начинает тормозиться (кривая *жзк*). При достижении ротором точки *з* площадка торможения *ежзи* становится равной площадке ускорения *абвгде*.

Момент достижения ротором угла, соответствующего точке *з*, где относительная скорость ротора приближается к нулевому зна-

чению, является наилучшим моментом отключения сопротивления и включения линии. Однако в общем случае, к этому моменту может еще не окончиться время, необходимое для деионизации места повреждения на линии или необходимое для включения масляных выключателей. Ротор генератора продолжает тормозиться, величина угла может перейти на нулевое значение угла и получить большое отрицательное значение, при этом скорость относительного движения ротора также достигает значительной величины (кривая 2); чтобы этого не произошло, нужно отключить нагрузочное сопротивление в какой-то точке k , тогда ротор снова начинает ускоряться (линия $mn'n$) и в момент включения n площадка ускорения $lmn'noo'$ будет близка по величине площадке торможения $изкл$. При таком моменте включения линии будут наименьшие по величине колебания угла ротора, причем эти колебания угла быстро затухнут. Изменение угла в зависимости от времени при таком принципе использования нагрузочных сопротивлений показано на рис. 1, в.

Расчетные условия, схема замещения электропередачи и электродинамическая модель

Расчеты произведены методом последовательных интервалов с учетом переходных электромагнитных процессов в роторе. Ввиду того, что гидрогенераторы являются машинами с явно выраженными полюсами, в расчетах брался реактанс, равный поперечному реактансу x_q , и фиктивная э. д. с. E_q . При расчетах учитывались активные сопротивления линии, трансформаторов и генераторов, емкостная проводимость линии и проводимость намагничивающего тока трансформатора.

В расчетах принималось, что по сравнению с генераторной станцией система имеет бесконечную мощность и напряжение шин приемной системы постоянно.

После расчета нормального режима были составлены схемы замещения электропередачи в аварийном режиме для каждого вида короткого замыкания и места повреждения на линии.

Расчет производился без учета регулятора напряжения.

Процесс во времени разбивался на интервалы по 0,05 сек., и расчет велся для каждого интервала в отдельности.

При отключении короткого замыкания определялись следующие эквивалентные схемы:

- а) отключенного состояния линии;
- б) с подключенным нагрузочным сопротивлением;
- в) после автоматического повторного включения.

Каждый раз находился собственный и взаимный импеданс и производился расчет до следующего момента переключения.

Все расчеты были проверены на электродинамической модели ИЭМ АН СССР.

Опыты на модели были произведены для случая подключения нагрузочного сопротивления на шины высокого напряжения станции.

Подробное описание устройств отдельных элементов, моделирующих электропередачу, а также их параметры см. в [7], описание углоизмерительной схемы см. в [8].

Влияние различных факторов на действие торможения

1. Вид и длительность короткого замыкания

Вид короткого замыкания резко сказывается на величине угла δ . Угол δ при коротких замыканиях, вследствие малого момента инерции ($M=7,75$ при приведении к базисным условиям), довольно быстро растет. При начальном угле $33^\circ 10'$ к концу третьего интервала, т. е. ко времени $0,15''$ с момента начала аварии угол возрастает при трехфазном коротком замыкании — до $56^\circ 14'$; при двухфазном коротком замыкании на землю — до $48^\circ 41'$; при двухфазном коротком замыкании — до $41^\circ 35'$; при однофазном замыкании на землю — до $39^\circ 37'$.

Время $0,15''$ принято как момент подключения нагрузочного сопротивления. Если бы короткое замыкание было отключено ранее, например, ко времени $0,10''$, то к моменту подключения нагрузочного сопротивления угол δ был бы равен соответственно $56^\circ 40'$; $50^\circ 03'$; $43^\circ 48'$ и $41^\circ 59'$. Таким образом, более раннее отключение короткого замыкания по отношению к моменту включения нагрузочного сопротивления $0,15''$ увеличивает угол δ , причем это увеличение меньше всего для трехфазного короткого замыкания и больше всего для однофазного замыкания на землю, чего и следовало ожидать, так как при отключении однофазного замыкания получается большой сброс мощности и угол δ начинает резко увеличиваться.

В дальнейшем, после подключения нагрузочного сопротивления, более раннее отключение короткого замыкания по отношению к моменту подключения нагрузочного сопротивления еще резче влияет на изменение угла δ .

2. Место подключения сопротивления

Влияние места подключения сопротивления можно рассмотреть на примере длительности короткого замыкания $0,10''$, времени включения нагрузочного сопротивления $0,15''$, времени деионизации $0,25''$ и времени автоматического повторного включения линии с одновременным отключением сопротивления $0,35''$ (рис. 2). При подключении нагрузочного сопротивления, равного $1,0$, на шины высокого напряжения станции угол δ к моменту повторного включения линии будет составлять при трехфазном коротком замыкании $88^\circ 40'$, при двухфазном коротком замыкании на землю $67^\circ 14'$, при двухфазном коротком замыкании $47^\circ 16'$, при однофазном замыкании на землю $41^\circ 56'$. При подключении такого же сопротивления на шины генераторного напряжения станции углы соответственно будут равны: $79^\circ 57'$; $58^\circ 35'$; $38^\circ 33'$; $32^\circ 55'$. Как видно, разница в значениях угла δ при одном и том же виде короткого замыкания при-

мерно одинакова, причем значения углов меньше в случае подключения сопротивления на шины генераторного напряжения. Это происходит потому, что избыток мощности при подключении сопро-

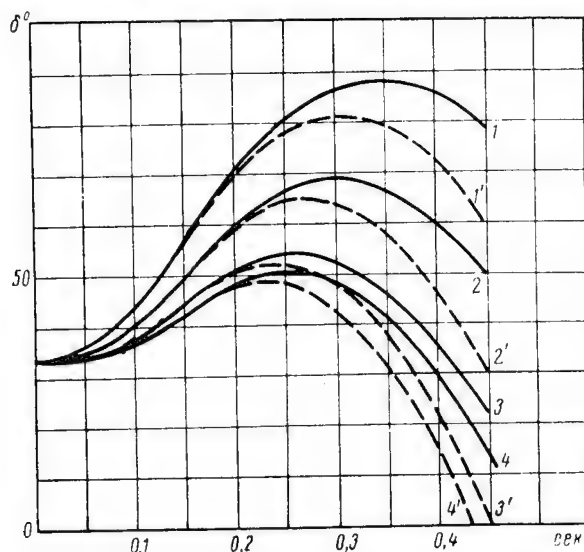


Рис. 2. Изменение относительного угла во времени при различных видах повреждения

1 — трехфазное короткое замыкание; 2 — двухфазное короткое замыкание на землю; 3 — двухфазное короткое замыкание; 4 — однофазное замыкание на землю при подключении нагрузочного сопротивления на шины высокого напряжения станции; 1', 2', 3', 4' — то же при подключении нагрузочного сопротивления на шины генераторного напряжения станции

тивления получается почти равным при различных предшествовавших видах повреждения, но величина его больше в случае подключения сопротивления на шины генераторного напряжения.

3. Место короткого замыкания на линии

При коротких замыканиях в начале, середине и конце линии угол δ при одном и том же виде повреждения почти не зависит от места короткого замыкания. Наибольшая разница в величине угла при времени отключения повреждения $0,15''$, при двухфазном коротком замыкании на землю около 4° , наименьшая — при двухфазном коротком замыкании — меньше 1° . Объясняется это сравнительно малой величиной реактанса линии по отношению к суммарной величине реактансов генераторов и трансформаторов станции.

После отключения короткого замыкания и включения нагрузочного сопротивления разница в величине угла δ в зависимости от места повреждения при одном и том же виде повреждения начинает увеличиваться, но не очень сильно. Однако при разных

видах повреждений и разном расположении их на линии получается очень большой разброс в величинах угла δ по отношению к одному и тому же времени. Так, например, при длительности короткого замыкания и моменте включения нагрузочного сопротивления $0,15''$ ко времени $0,40''$ угол δ может иметь значения от плюс $85^{\circ}57'$ при трехфазном коротком замыкании в начале линии до минус $3^{\circ}30'$ при однофазном замыкании на землю в конце линии.

4. Длина линии

При изменении длины изменяется нормальный режим работы электропередачи. Тем не менее длина линии не оказывает существенного влияния на величину угла δ для каждого вида повреждения. Например, значения угла ко времени $0,40''$ (длительность короткого замыкания и момент включения сопротивления $0,15''$), при трехфазном коротком замыкании в начале линии составляют: соответственно $88^{\circ}54'$; $85^{\circ}57'$ и $82^{\circ}34'$ для линии половинной, нормальной и двойной длины (максимальное значение угла δ при линии половинной длины).

При двухфазном коротком замыкании на землю в начале линии при тех же длинах линии и к тому же времени значения угла будут: $46^{\circ}45'$; $47^{\circ}58'$ и $49^{\circ}46'$ (максимальное значение угла δ при линии двойной длины). При двухфазном коротком замыкании на землю в конце линии получается аналогичная картина.

Различная зависимость максимального значения угла δ от длины линии при трехфазном коротком замыкании и двухфазном коротком замыкании на землю получается вследствие того, что при последнем виде повреждения станция не отделяется от системы полностью, а передает в нее часть мощности.

В целом необходимо отметить, что при коротком цикле автоматического повторного включения длина линии мало влияет на разброс величины угла δ особенно по сравнению с тем как влияют разные виды повреждений при линии нормальной длины. Следовательно, в этом случае результаты расчетов могут быть распространены на любые практически применяемые длины линии соответствующего напряжения (кроме сверхдальних).

5. Длительность цикла трехфазного автоматического повторного включения

При наличии на линии воздушных выключателей, т. е. при возможности осуществления малой длительности цикла (например— $0,40''$), станция останется в синхронизме с системой вне зависимости от вида и места повреждения линии, при любой ее длине, практически используемой (рис. 3).

При большей длительности цикла условия повторного включения линии становятся менее благоприятными (см. рис. 1, б и 1, в, кривая 2), и станция может не удержаться в синхронизме после автоматического повторного включения линии, если не использовать более раннее отключение нагрузочного сопротивления.

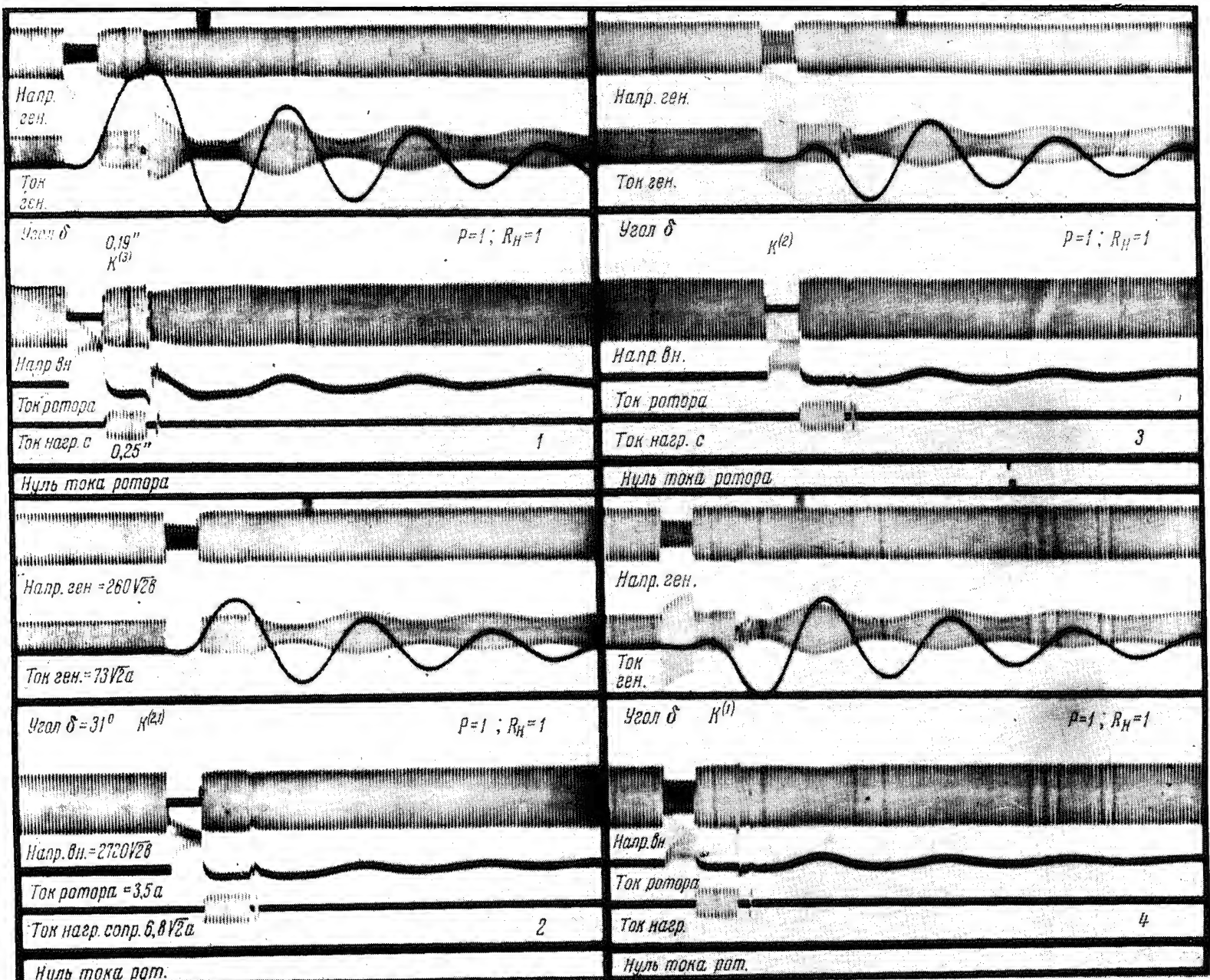


Рис. 3. Осциллограммы 1, 2, 3, 4 (малый цикл ТАПВ)

Короткое замыкание; отключение линии с одновременным включением нагрузочного сопротивления, равного 1,0; действие нагрузочного сопротивления в течение 0,25";
отключение нагрузочного сопротивления и одновременное ТАПВ линии;
 $K^{(3)}$ — трехфазное короткое замыкание; $K^{(2,1)}$ — двухфазное короткое замыкание на землю; $K^{(2)}$ — двухфазное короткое замыкание;
 $K^{(1)}$ — однофазное замыкание на землю

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
27	2-я сверху	$a = \frac{0}{\pi x + B} =$	$a = \frac{A}{\pi x + B} =$
48	1-я "	68 <i>ма</i>	64 <i>ма</i>
74	10-я "	[7].	[6].
158	7 и 8-я снизу	электростатическом	электрическом
159	9 и 10-я снизу	электростатической	электрической
162	5-я снизу	электростатического	электрического
164	3-я сверху		
165	4-я "		
180	3-я "	$V \sqrt{l_x^2 + a^2 + l_y^2 + l_y}$	$V \sqrt{l_x^2 + a^2 + l_y^2 + l_y}$
180	6-я "	$a \sqrt{l_x^2 + l_y^2 + a^2 - (l^2 + a^2)}$	$a \sqrt{l_x^2 + l_y^2 + a^2 - (l_y^2 + a^2)}$
206	9-я "	$+ \frac{1}{4U} \frac{d^2 U}{dz^2} r +$	$\frac{1}{4U} \frac{d^2 U}{dz^2} r +$
209	10-я "	$\left(\frac{I}{\sqrt{2 \frac{e}{m} U_L \pi \epsilon \eta x}} \right)^{1/2}$	$\left(\frac{I}{\sqrt{2 \frac{e}{m} U_L \pi^2 \epsilon \eta x}} \right)^{1/2}$
296	11-я "	$\frac{l_{d_{nc}}}{s}$	$l_{d_{nc}}$
308	5-я снизу	31/X 1958 г.	31/X 1957 г.

ПОПРАВКА

На стр. 16 подпись под рис. 4 относится к рис. 5, а подпись под рис. 5 относится к рис. 4.

*6. Сочетание времени отключения короткого замыкания
и времени включения нагрузочного сопротивления*

Такое сочетание времен было проверено при длительности короткого замыкания $0,15''$, времени включения линии и отключения нагрузочного сопротивления $0,40''$ при разных моментах включения этого сопротивления.

При включении нагрузочного сопротивления в период времени $0''—0,15''$ оно оказывается при трехфазном замыкании полностью зашунтированным и не производит никакого действия, а при однофазном замыкании на землю, наоборот, — производит в сумме с отдаваемой в течение короткого замыкания мощностью очень большое торможение, в чем совершенно нет необходимости. При двухфазном коротком замыкании на землю получается небольшой эффект торможения. При двухфазном коротком замыкании, как и при однофазном замыкании на землю, эффект получается достаточно большим, но совершенно бесцельным, так как при этом после включения линии увеличиваются колебания угла.

При более позднем включении нагрузочного сопротивления, в период $0,15''—0,40''$ получается следующая картина.

После отключения короткого замыкания ротор начинает ускоряться 100-процентным вращающим моментом, угол δ быстро увеличивается, условия сохранения синхронизма при повторном включении затрудняются.

При включении нагрузочного сопротивления со временем, большим чем $0,12''$ — после отключения трехфазного короткого замыкания, $0,16''$ — после двухфазного короткого замыкания на землю, $0,21''$ — после двухфазного короткого замыкания и однофазного замыкания на землю, станция, как показали опыты, в синхронизме не удерживается.

Более позднее отключение сопротивления по отношению ко времени включения линии при всех видах повреждения ухудшало дальнейший процесс. Следовательно, нагрузочное сопротивление нужно включать сейчас же после отключения короткого замыкания, можно немного позже, если нет включателя с таким малым временем включения. Во всяком случае нет смысла стремиться ко включению сопротивления до отключения короткого замыкания.

7. Коэффициент мощности передаваемой нагрузки

Влияние коэффициента мощности передаваемой нагрузки было исследовано при следующих условиях. Вместо $\cos \varphi_0 = 0,9$ и $\cos \varphi_r = 0,8$ был принят режим $\cos \varphi_0 = 0,98$ и $\cos \varphi_r = 0,92$. Начальный угол δ при этом вместо $33^\circ 10'$ имеет величину $39^\circ 18'$.

При действии нагрузочного сопротивления после отключения короткого замыкания угол принимает гораздо большие значения, так как избыточная мощность увеличивается. Поэтому, например, при отключении сопротивления через $0,50''$ после отключения

трехфазного короткого замыкания и включении линии через 0,70" станция не удерживается в синхронной работе с системой, угол δ при этом будет порядка 140°.

При предшествовавшем нормальном режиме и тех же временах отключения сопротивления и включения линии станция удерживается в синхронизме.

8. Величина номинального напряжения линии

Все расчеты в данной работе выполнены в относительных единицах. За базисное напряжение линии принято номинальное напряжение 220 кВ. За базисную мощность принята натуральная мощность линии 120 мВт.

Если за базисное напряжение линии принять 110 кВ, то при базисной мощности 30 мВт все значения в относительных единицах окажутся теми же, за исключением величины активного сопротивления линии: $r_d = 0,078$ против $r_d = 0,029$ при 220 кВ (при одной и той же экономической плотности тока для проводов линии).

Как показали расчеты, увеличение активного сопротивления линии не вносит значительных изменений в величины, характеризующие нормальный режим электропередачи. Поэтому результаты расчета могут быть распространены и на линии 110 кВ с соответствующим базисным напряжением и базисной мощностью.

9. Величина передаваемой мощности

Величина передаваемой мощности значительно влияет на угол δ и относительную скорость ротора, получающиеся в течение процесса короткого замыкания и электрического торможения. В частности, при отключении короткого замыкания и включении нагрузочного сопротивления в момент 0,15", ко времени 0,40" разница в значениях угла δ при различных видах повреждения в случае половинной мощности получается порядка 40°, а при нормальной она составляет приблизительно 80° (рис. 4).

Учитывая, что в процессе работы гидростанции передаваемая мощность может оказаться самой различной, следует ожидать большой разброс в значениях угла δ даже при времени действия воздушных выключателей, если оставлять сопротивление включенным во все время деионизации линии.

В целях уточнения характера работы установки при малых циклах включения были сделаны опыты с автоматическим повторным включением линии со временем деионизации 0,25" без включения нагрузочного сопротивления. При мощности 0,75 после трехфазного короткого замыкания генератор не смог войти в синхронизм с системой, при остальных же видах повреждений, а также при мощности 0,5 синхронизм сохранялся во всех случаях. Следовательно, при мощности 0,50 и меньше включать нагрузочное сопротивление нет надобности.

На модели были проверены также результаты включения нагрузочных сопротивлений после различных видов повреждений при предшествующих режимах с величиной мощности 1,25; 1,00; 0,75; 0,50 и 0,25 от номинальной при большой длительности цикла.

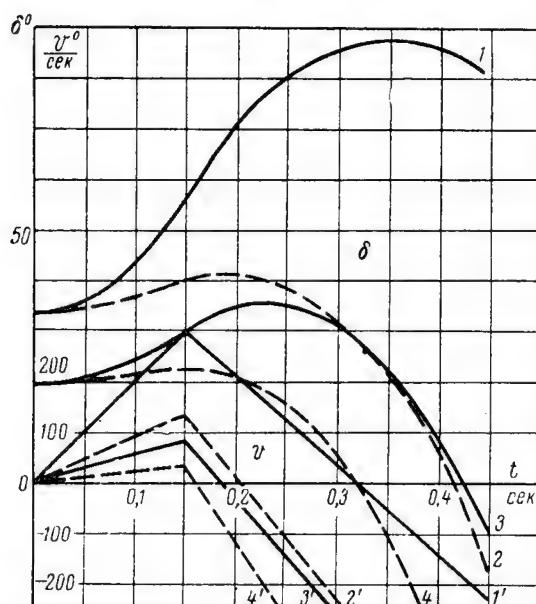


Рис. 4. Влияние величины передаваемой мощности на изменение относительного угла (кривые 1, 2, 3, 4) и относительной скорости во времени (кривые 1', 2', 3', 4')

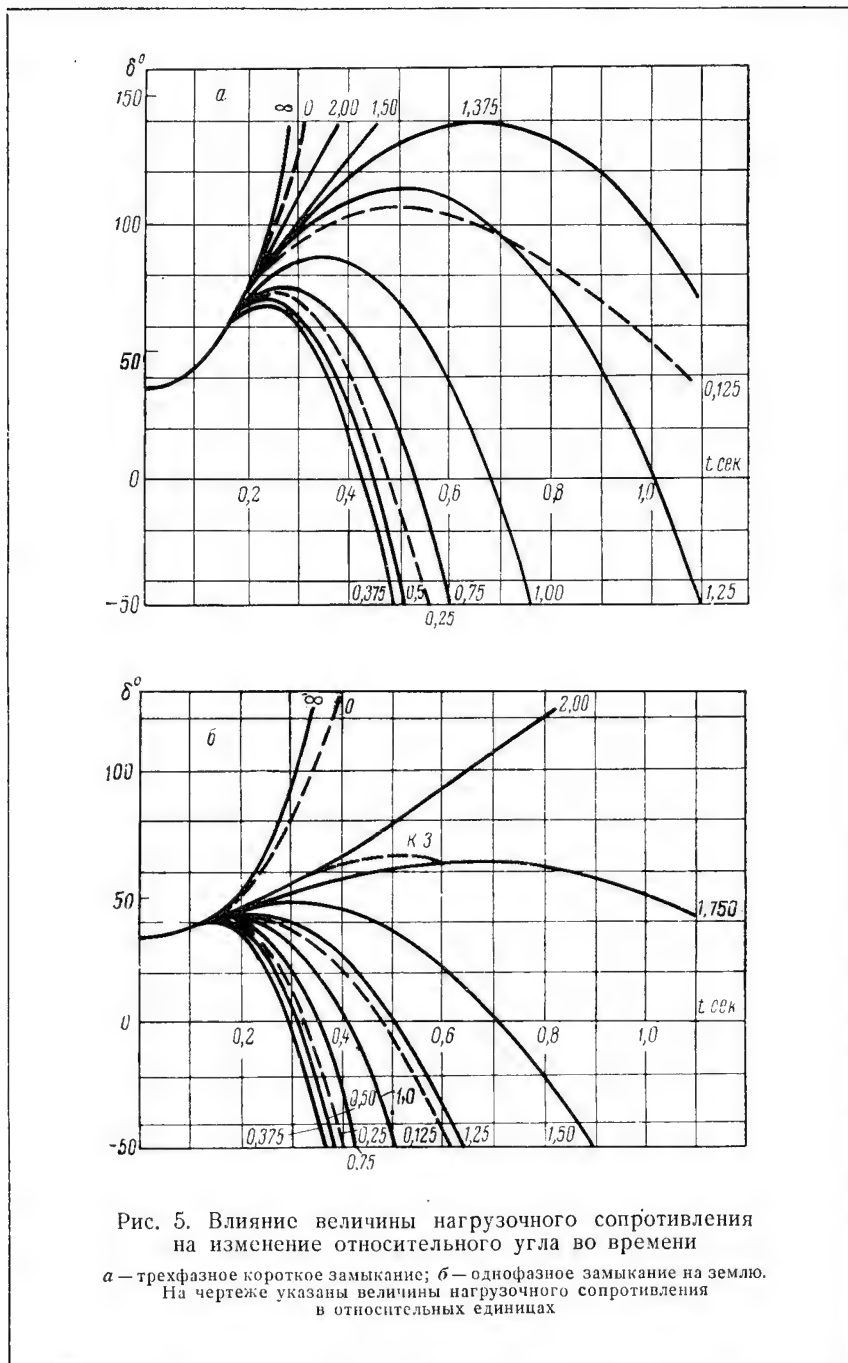
1; 1' — трехфазное короткое замыкание, передаваемая мощность $P = 1,0$; 2; 2' — однофазное замыкание на землю, $P = 1,0$; 3; 3' — трехфазное короткое замыкание, $P = 0,5$; 4; 4' — однофазное замыкание на землю, $P = 0,5$

В этом случае сопротивление отключалось через 0,50" после отключения повреждения, линия включалась через 0,70" после отключения повреждения.

Оказалось, что для разных величин передаваемой мощности одна и та же величина нагрузочного сопротивления при одной и той же длительности включенного состояния этого сопротивления применена быть не может.

10. Величина нагрузочного сопротивления

Для определения влияния величины нагрузочного сопротивления были произведены расчеты изменения угла δ в зависимости от времени их действия при длительности короткого замыкания 0,15" и включении нагрузочных сопротивлений в момент отключения короткого замыкания.



Величина нагрузочных сопротивлений принималась в относительных единицах равной: 2,00; 1,75; 1,50; 1,25; 1,00; 0,75; 0,50; 0,375; 0,25 и 0,125.

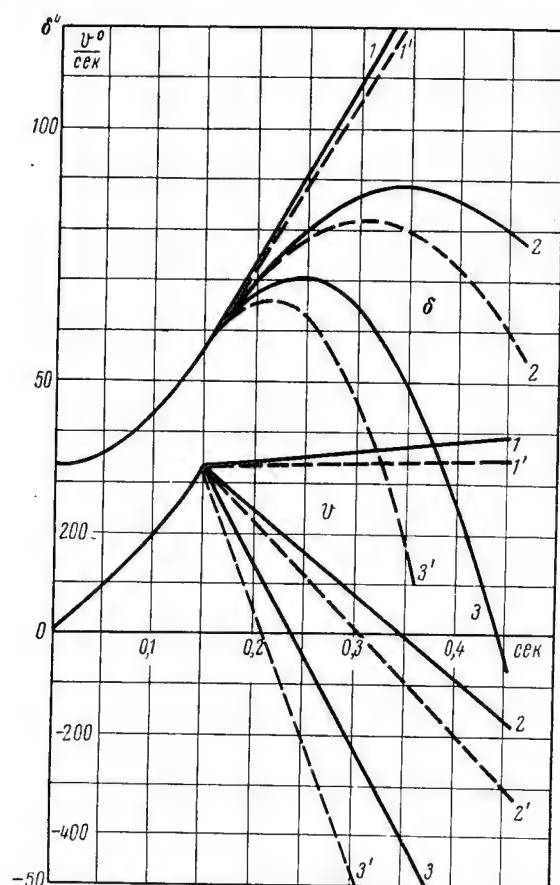


Рис. 6. Влияние места подключения и величины нагрузочного сопротивления на изменение относительного угла и относительной скорости во времени

1 — величина нагрузочного сопротивления $R_H = 2,0$;
 2 — $R_H = 1,0$; 3 — $R_H = 0,5$ — при подключении сопротивления на шины высокого напряжения станции;
 1', 2', 3' — то же при подключении сопротивления на шины генераторного напряжения

Предварительными расчетами, а также испытаниями на модели установлено, что чем меньше величина сопротивления, тем оно успешнее действует в отношении торможения. Максимальные и текущие значения углов δ в зависимости от времени получаются

меньшими при уменьшении величины сопротивления. Наиболее эффективно действующим является сопротивление порядка $0,3 \div 0,4$. При дальнейшем уменьшении сопротивления значения углов при том же времени начинают расти (рис. 5а и 5б).

Необходимо отметить, что при сопротивлении величиной $0,3 \div 0,4$ очень сильно возрастает мощность, поглощаемая сопротивлением.

Была также проанализирована эффективность действия нагрузочных сопротивлений разной величины в зависимости от включения их на шины высокого напряжения станции или на шины генераторного напряжения (длительность короткого замыкания $0,10''$, время включения сопротивления $0,15''$). При значении сопротивления, равном 2,00 и больше, действие его почти не зависит от места включения (рис. 6).

При сопротивлении, меньшем 2,00, и включении последнего на генераторном напряжении, тормозящее действие его более значительно, чем при подключении на шины высокого напряжения станции и оно тем больше, чем меньше само сопротивление (вплоть до величины сопротивления порядка $0,3 \div 0,4$, см. выше).

Эффективность торможения во времени гораздо значительней при более легких видах повреждения.

11. Взаимосвязь величины сопротивления, длительности цикла и величины передаваемой мощности

Если при нормальном режиме возникло короткое замыкание, которое было отключено со временем $0,15''$, и в этот момент было включено нагрузочное сопротивление, отключающееся одновременно со включением линии к моменту $0,40''$ (включение линии при наличии воздушных выключателей), то генератор всегда удерживался в синхронизме при сопротивлениях от 1,75 до 0,125 в случае трехфазного короткого замыкания и от 2,00 до 0,50 при однофазном замыкании на землю.

Таким образом, при одном и том же нормальном режиме и наличии на линии воздушных выключателей можно выбрать величину сопротивления, при которой генератор всегда будет удерживаться в синхронизме после коротких замыканий, их отключений, включения нагрузочного сопротивления и действия его во весь период до повторного включения линии (см. рис. 3). Величина нагрузочного сопротивления должна быть порядка 1,00. При этом можно не опасаться изменения величины сопротивления на $\pm 50\%$.

Величина передаваемой мощности от 1,25 до 0,75 при сопротивлении, равном 1,00, будет изменять угол δ в пределах, когда удержание в синхронизме возможно; при мощности 0,5 и меньше нагрузочное сопротивление включать не надо. Хотя, конечно, в целях более быстрого успокоения качаний целесообразно, чтобы величина сопротивления соответствовала величине предшествовавшей нагрузке линии.

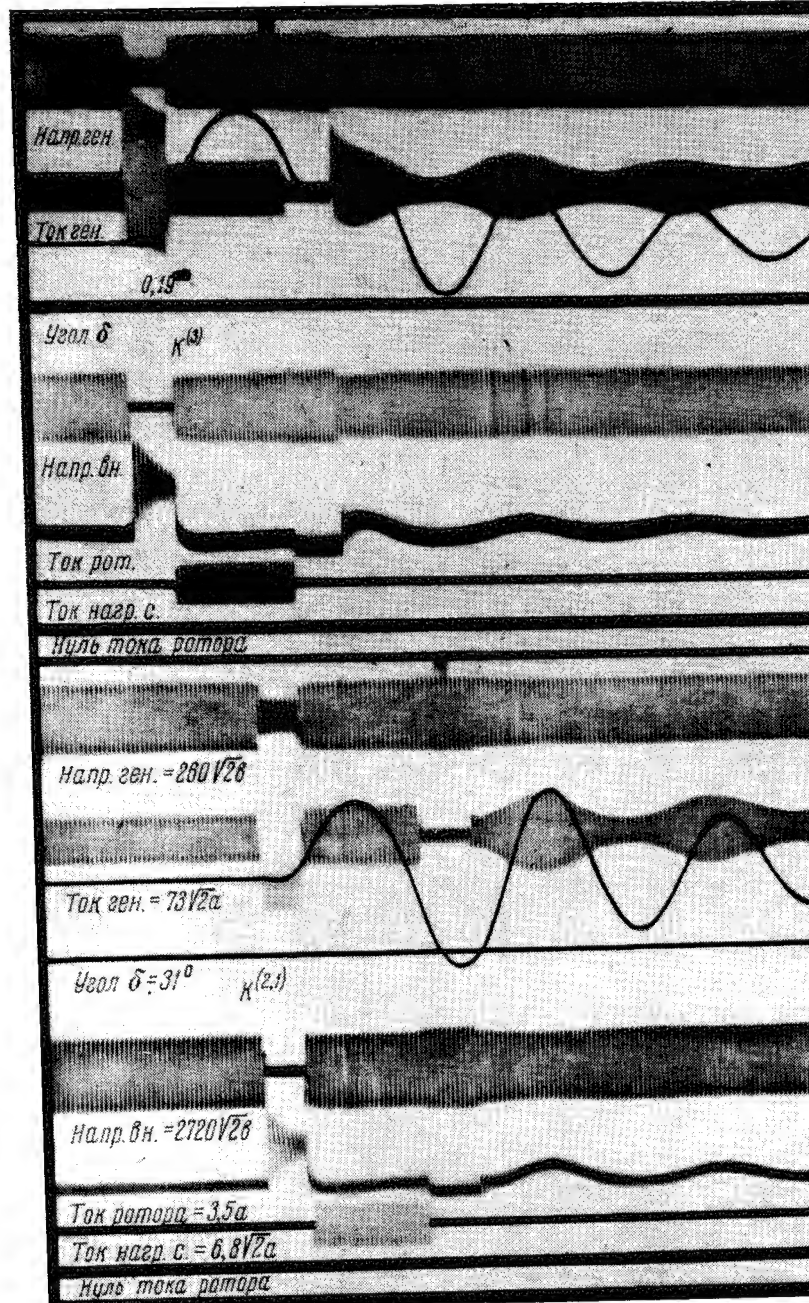
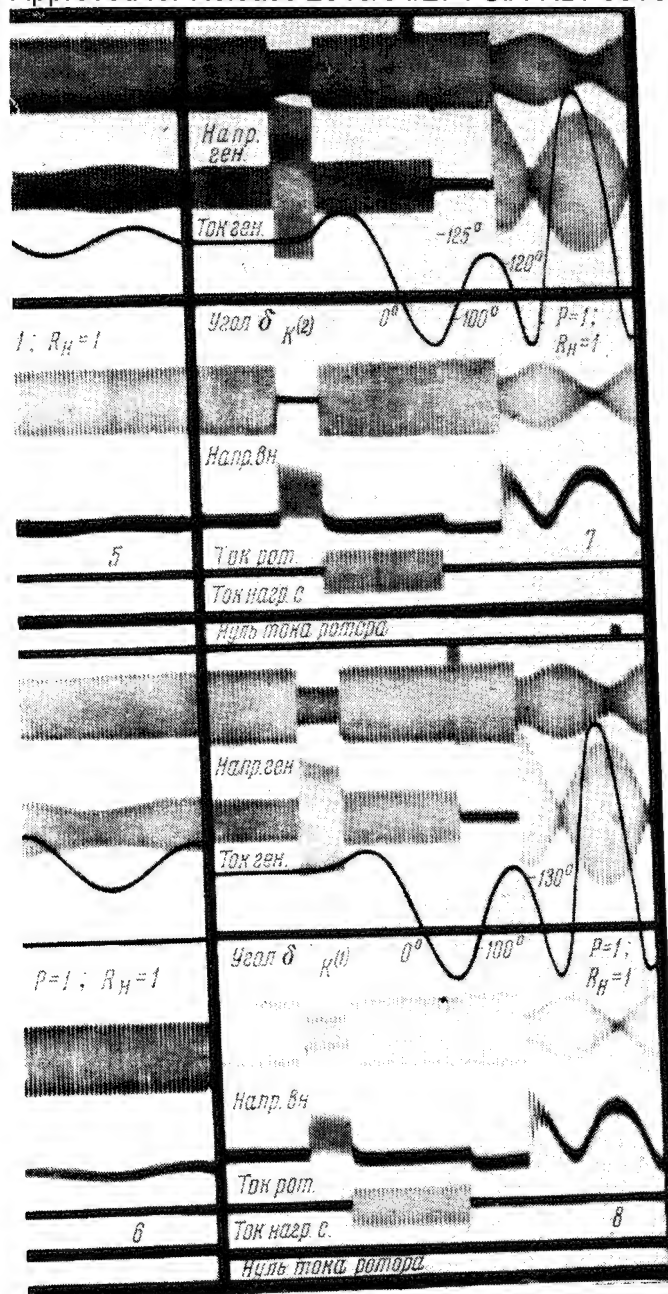


Рис. 7. Осциллограммы 5, 6, 7

Короткое замыкание; отключение линии с одновременным включением нагруз
в течение 0,50"; ТАПВ линии через 0,20" посл
 $K^{(3)}$ — трехфазное короткое замыкание; $K^{(2,1)}$ — двухфазное коротко
 $K^{(1)}$ — однофазное за



льшой цикл ТАПВ)

опротвления, равного 1,0; действие нагрузочного сопротивления
 ения нагрузочного сопротивления
 ание на землю; $K(2)$ — двухфазное короткое замыкание;
 на землю

При тех же условиях, что и выше, но при отключении нагрузочного сопротивления и включении линии к моменту 0,85" (при наличии на линии масляных выключателей типа МКП-220 с приводом ПЭ-42[9]) при трехфазных коротких замыканиях генератор при значениях нагрузочного сопротивления 1,5 и больше, а также 0,75 и меньше в синхронизме не удерживался. Соответственно при однофазных замыканиях на землю генератор оставался в синхронизме при значениях нагрузочного сопротивления, равных 1,75 и 1,50 и не удерживался при сопротивлении 1,25.

При сопротивлении 0,75 ротор „провертывался“ и после включения стремился остаться в синхронизме.

Следовательно, для выключателей с большим циклом включения нельзя подобрать такого сопротивления, чтобы оно годилось для любого вида повреждения и было бы включено все время после любого вида повреждения. В этом случае нужно более строго подходить к величине нагрузочного сопротивления и длительности его действия.

Величина нагрузочного сопротивления должна соответствовать по мощности величине нагрузки перед повреждением, т. е. необходимо автоматическое регулирование величины нагрузочного сопротивления в зависимости от величины передаваемой мощности. Момент отключения сопротивления должен быть разным для разных видов повреждений и должен определяться не уставкой по времени (рис. 7), а величиной, присущей данному режиму переключений, например, величиной угла. Эта задаваемая величина угла должна определяться, исходя из времени отключенного состояния линии. При длительности цикла автоматического повторного включения линии, большей 0,85", очевидно потребуются повторное включение нагрузочного сопротивления, а также управление этим сопротивлением не только по углу, но и в сочетании угла и его производных.

Выводы

Исследования показали, что электрическое торможение генераторов позволяет без особых затруднений применить трехфазное автоматическое повторное включение одноцепной линии, соединяющей гидростанцию с системой, если на этой линии установлены воздушные выключатели. При этом нет необходимости регулировать величину нагрузочного сопротивления.

В случае эксплуатации на линии выключателей, имеющих большую длительность цикла, применение ТАПВ при наличии электрического торможения тоже принципиально возможно. Однако в этом случае во время работы гидростанции следует автоматически регулировать величину нагрузочного сопротивления, производящего торможение, в соответствии с величиной передаваемой мощности; кроме того, необходимо обеспечить управление длительностью торможения с помощью специальной установки, измеряющей угол между э. д. с. генератора и напряжением системы.

Приложение

Вывод уравнения для приближенного определения величины нагрузочного сопротивления, наиболее активно действующей при электрическом торможении

Обратимся к выражению активной мощности, отдаваемой в систему генераторами с явно выраженными полюсами:

$$P = \frac{E_Q^2}{z_{11}} \cdot \sin \alpha_{11} + \frac{E_Q U}{z_{12}} \cdot \sin (\delta - \alpha_{12}), \quad (1)$$

где:

- P — активная мощность;
- E_Q — фиктивная э. д. с.;
- U — напряжение шин системы бесконечной мощности;
- z_{11}, z_{12} — собственное и взаимное сопротивления в схеме замещения;
- α_{11}, α_{12} — дополнительные углы собственного и взаимного сопротивлений;
- δ — фаза вектора э. д. с. эквивалентного генератора.

В этом уравнении значение фиктивной э. д. с. E_Q , как известно, выражается формулой:

$$E_Q = \frac{E'_d}{1 - \frac{x_q - x'_d}{z_{11}} \cdot \cos \alpha_{11}} - \frac{U}{z_{12}} \cdot \frac{\cos (\delta - \alpha_{12})}{\frac{1}{x_q - x'_d} - \frac{\cos \alpha_{11}}{z_{11}}}, \quad (2)$$

где:

- E'_d — э. д. с. за продольным переходным реактивным сопротивлением;
 - x'_d — продольное переходное реактивное сопротивление;
 - x_q — поперечное синхронное реактивное сопротивление.
- Так как во время отключенного состояния линии

$$z_{12} = \infty, \quad (3)$$

то вторые члены правой части уравнений (1), (2) равны нулю.

Следовательно, после подстановки значения E_Q в уравнение (1), последнее примет такой вид:

$$P = \frac{(E'_d)^2}{\left(1 - \frac{x_q - x'_d}{z_{11}} \cdot \cos \alpha_{11}\right)^2} \cdot \frac{\sin \alpha_{11}}{z_{11}}. \quad (4)$$

Наиболее активно действующая величина сопротивления представляет собою такое значение R , при котором функция $P(R)$ достигнет максимума. Эта величина отыскивается обычным путем. Берем производную P по R и приравняем ее нулю

$$\frac{dP}{dR} = 0; \quad (5)$$

учитывая, что при подключении сопротивления на шины высокого напряжения станции в уравнении (4)

$$z_{11} = r_2 + jx_2 + r_T + jx_T + \frac{Rjx_\mu}{R+jx_\mu} = z_{11} \cos \alpha_{11} + jz_{11} \sin \alpha_{11}, \quad (6)$$

где:

$$x_2 = x_q;$$

R — величина нагрузочного сопротивления;

r_2 — активное сопротивление генератора;

x_T — реактивное сопротивление трансформатора;

r_T — активное сопротивление трансформатора;

x_μ — сопротивление ветви намагничивания трансформатора.

Приведем уравнение (4) к выражению, удобному для дифференцирования, путем следующих подстановок.

Обозначая

$$z = a + jb, \quad (7)$$

получим:

$$\frac{\sin \alpha_{11}}{z_{11}} = \frac{b}{a^2 + b^2}; \quad \frac{\cos \alpha_{11}}{z_{11}} = \frac{a}{a^2 + b^2}. \quad (8)$$

Тогда интересующее нас уравнение примет такой вид:

$$P = k \frac{b(a^2 + b^2)}{(a^2 + b^2)^2 - 2ac(a^2 + b^2) + a^2c^2}, \quad (9)$$

где

$$x_q - x'd = c; \quad (E'd)^2 = k. \quad (10)$$

После дифференцирования приходим к следующему результату:

$$a' [(a^2 + b^2)^2 (b^2 - a^2 - 2bc) + b^2c^2 (b^2 + 3a^2)] + \\ + b' \cdot 2a [(a^2 + b^2)^2 (c - b) - a^2bc^2] = 0. \quad (11)$$

Если вести расчет без учета сопротивления ветви намагничивания, считая его бесконечно большим, то уравнение (11) будет значительно проще ($a' = 1$; $b' = 0$), причем степень его можно понизить заменой

$$a^2 = x,$$

т. е. в конечном счете получить уравнение третьей степени такого вида:

$$x^3 + b(b + 2c)x^2 + b^2(b - c)(3c - b)x + b^4(b - c)^2 = 0. \quad (12)$$

В результате решения этого уравнения, после подстановки соответствующих значений для данного конкретного примера (рис. 1, а):

$$a = 0,0107 + R; \quad b = 0,703; \quad c = 0,328;$$

получим:

$$a = \sqrt{x} = 0,3930$$

и, следовательно, приближенное значение сопротивления:

$$R_1 = a - 0,0107 = 0,3823.$$

Необходимо отметить, что при учете сопротивления ветви намагничивания получается

$$R_2 = 0,3758,$$

т. е. в случае приближенного решения по уравнению (12) ошибка не превышает 2%.

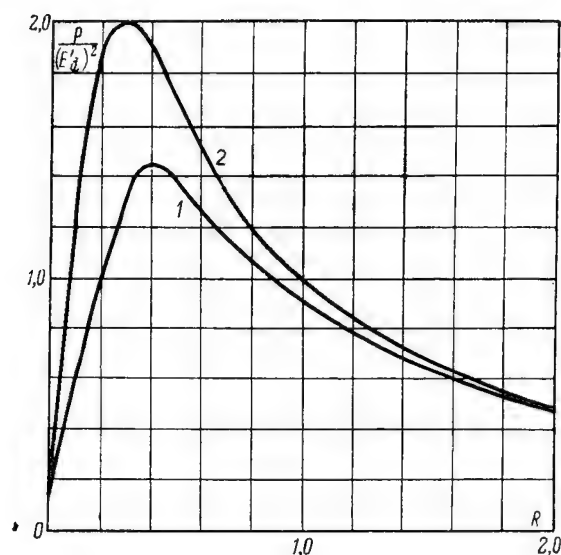


Рис. 8. Влияние величины нагрузочного сопротивления на отношение величины передаваемой мощности к $(E_d')^2$.

1 — нагрузочное сопротивление подключено на шины высокого напряжения станции;
2 — нагрузочное сопротивление подключено на шины генераторного напряжения станции

Тем же самым методом были определены и значения нагрузочного сопротивления, подключенного на шины генераторного напряжения (исходя из соответствующего выражения для z_{11}):

$$R_3 = 0,2966 \text{ (приближенно);}$$

$$R_4 = 0,2940 \text{ (с учетом сопротивления ветви намагничивания).}$$

Ошибка в этом случае получается не более 1%.

Таким образом, пользование уравнением (12) дает достаточно быстрое и точное решение задачи.

С помощью кривой, построенной по уравнению (4) и изображенной на рис. 8, можно определить величину $P(R)$ для данного момента времени и предшествовавшего вида короткого замыкания, умножая значение ординат на соответствующее $(E_d')^2$.

Как указывалось в статье, при подсчете по методу последовательных интервалов наиболее эффективно действующим для принятой исходной схемы является сопротивление порядка $0,3 \div 0,4$, что подтверждается и приведенными аналитическими расчетами.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. C. Bergvoll, Метод последовательного сопротивления для увеличения предела динамической устойчивости, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, V 50, June, № 2, 1931.
2. M. François Gahen, Торможение группы гидрогенераторов внезапным подключением жидкостных сопротивлений к шинам генераторов, Revue Générale de L'électricité, Juin, Tome LVI — № 6, 1947.
3. Д. И. Азарьев, Повышение пропускной способности электропередач, Электричество, № 6, 1955.
4. А. П. Аугустайтис, Экспериментальное исследование применения параллельных и последовательных нагрузочных сопротивлений для увеличения динамической устойчивости электрических передач, Ленинградский политехнический институт, Тезисы докладов Межвузовской научно-технической конференции по дальним электропередачам, 1956.
5. В. Н. Шестопалов, Управление торможением генераторов электростанций дальних передач в переходном послеаварийном режиме, Сборник трудов института электротехники АН УССР, выпуск 13, Издательство АН УССР, Киев, 1956.
6. А. В. Грехов, Исследование схем повышения динамической устойчивости электрических систем путем включения нагрузочных сопротивлений, Автореферат, Издательство АН УзССР, Ташкент, 1956.
7. Отчет № 2 лаборатории № 11 ЛОИАТ АН СССР, «Моделирование элементов мощных энергосистем», 1955.
8. Отчет № 3 лаборатории № 11 ЛОИАТ АН СССР, «Разработка и исследование регулятора возбуждения», 1953.
9. Г. Е. Хромченко, Высоковольтные выключающие аппараты, М. 1955.

Поступила в апреле 1957 г.

Аспирант Е. А. ХАГЕМЕЙСТЕР

УСКОРЕННОЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ С САМОСИНХРОНИЗАЦИЕЙ КРУПНЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ (УАПВС)

Введение

Автоматическое повторное включение с самосинхронизацией (АПВС) гидрогенераторов находит в последнее время широкое применение [1, 2, 3]. Однако внедрению АПВС в ряде случаев еще препятствует недостаточное изучение процессов, происходящих в гидроагрегате при АПВС. Этим же объясняется основной недостаток имеющихся схем АПВС (например, разработанных в отделе автоматики, телемеханики и наладки Гидроэнергопроекта (ОАТН ГИДЭП) [4, 3] — большая продолжительность процесса АПВС, ведущая к длительной (на все время процесса) потере энергосистемой генерирующей мощности ГЭС. Это может повлечь за собой снижение частоты и дальнейшее развитие аварии в энергосистеме. Поэтому в данный момент основной задачей является резкое сокращение бестоковой паузы генератора путем ускорения всего процесса АПВС.

Целью настоящей работы является (исходя из теоретического и практического исследования некоторых процессов, происходящих при АПВС) нахождение и обоснование пути ускорения АПВС, разработка некоторых моментов расчета ускоренного АПВС — (УАПВС). Разработка релейных схем в задачу данной работы не входит.

1. Развитие АПВС

Автоматическое повторное включение с самосинхронизацией возникло вслед за освоением самого способа включения на параллельную работу синхронной машины путем ее самосинхронизации [1, 5]. Как известно, в отличие от способа точной синхронизации, требующего точного совпадения фаз, частоты и напряжения синхронизируемой машины и системы, способ самосин-

хронизации допускает включение невозбужденной машины при ее скорости, отличающейся от синхронной в больших пределах. Это позволяет значительно упростить всю автоматику агрегата и тем самым повысить надежность работы ГЭС в целом. Теоретически и практически в СССР способ самосинхронизации был обоснован и внедрен в эксплуатацию д. т. н. проф. И. А. Сыромятниковым, к. т. н. Л. Г. Мамиконянцем, к. т. н. Ю. М. Элькиндом и др. [5, 1, 6, 7].

Кроме своего основного назначения — упрощения процесса включения синхронного генератора на параллельную работу, — способ самосинхронизации открыл новые возможности для АПВ объектов, для которых прежние способы АПВ не были приемлемыми. Это относится, в первую очередь, к линиям и подстанциям с большим односторонним перетоком активной мощности.

Применявшееся до сих пор трехфазное АПВ — (ТАПВ) обуславливалось требованием синхронного хода отделившейся ГЭС с остальной системой. Однако в случае отключения линии с большим односторонним перетоком мощности, например, единственной связи удаленной ГЭС с системой, это требование приводит к необходимости осуществить ТАПВ за $0,2 \div 0,4$ сек, что крайне затруднительно.

Оснащение таких ЛЭП устройствами улавливания синхронизма или введение однофазного АПВ — (ОАПВ) чрезвычайно усложняет релейную защиту и увеличивает фактор ненадежности. По мнению некоторых энергосистем, например, Ленэнерго [8], ОАПВ вообще не может рассматриваться как элемент основной защиты ЛЭП.

Новый толчок развитию АПВ дало внедрение способа самосинхронизации. Появились два принципиально новых способа АПВ:

- 1) АПВ без проверки синхронизма — АПВ б/с [9];
- 2) АПВ с самосинхронизацией — АПВС.

Первый способ основывается на том, что при наличии достаточно большой реактивности связи ГЭС с системой, можно допустить их повторное включение при полном напряжении; при этом токи в генераторах не превзойдут (даже при $\angle 180^\circ$ между векторами напряжения системы и э. д. с. генератора) определенного значения (для гидрогенератора — 3-кратного, турбогенератора — 5-кратного), а несинхронные части после нескольких качаний войдут в синхронизм. Ограничение по току определяет минимальный реактанс связи, допускающий применение АПВ б/с.

Второй способ является более гибким, он не вводит ограничения по реактансу связи, но требует гашения полей до $0,2 U$, связанных с линией генераторов, и снижения их скорости вращения после сброса нагрузки до номинальной, что требует сравнительно большого времени (10—30 сек.).

Как показал опыт и расчет, токи, возникающие при АПВС, не превосходят таковых при обычной самосинхронизации, не вызывая при этом больших толчков мощности в энергосистеме (что характерно для АПВ б/с). К преимуществам АПВ б/с и АПВС перед

ТАПВ и ОАПВ следует отнести возможность проведения АПВ б/с и АПВС при качаниях частоты в системе или ее сильном отклонении от номинала. ТАПВ и ОАПВ в таких случаях могут не сработать.

Из приведенного видно, что АПВС (рис. 1) отличается рядом преимуществ от других способов АПВ. Основным же недостатком

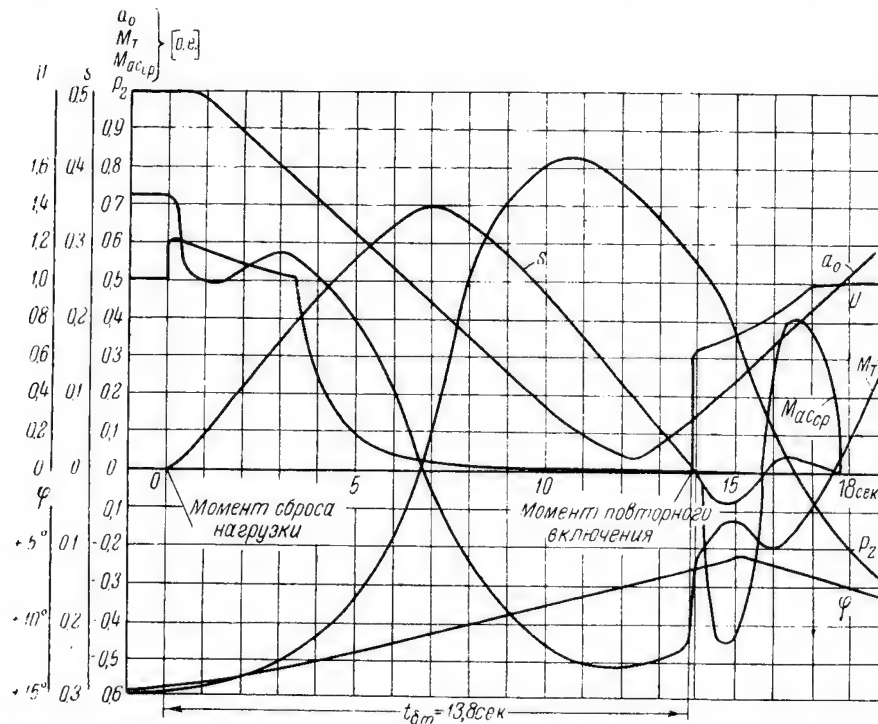


Рис. 1. АПВС при подсинхронной скорости
Длительность бестоковой паузы $t_{\delta, м.} = 13,8$ сек.

АПВС является длительная бестоковая пауза генератора. Однако при подробном исследовании происходящих в гидроагрегате процессов при АПВС можно выявить пути сокращения бестоковой паузы генератора с общим ускорением всего процесса.

Как показали экспериментальные материалы, время, необходимое для АПВС, можно сократить с 10—30 сек. до 3÷6 сек, т. е. в 3—4 раза.

II. Описание процесса АПВС

Как показывает многолетняя статистика, основная часть повреждений, имеющих место в энергосистемах, около 74% [10], возникает в электрических сетях и открытых распределительных устрой-

ствах. Главным образом это короткие замыкания, возникающие от перекрытия загрязненных изоляторов, закорачивания фаз посторонними предметами или птицами и наиболее часто — от атмосферных перенапряжений.

Во всех перечисленных случаях, если не возникало механических повреждений, например, обрыва провода, при прекращении питания места короткого замыкания, дуга гаснет и повреждение тем самым самоустраивается. Через некоторое время, необходимое для деионизации канала дуги ($0,3 \div 0,4$ сек. при 220 кВ), можно отключенный защитой участок линии или секцию ОРУ включить повторно под напряжение. Этот процесс можно автоматизировать, т. е. применить АПВ, различные способы проведения которого были рассмотрены выше.

Для упрощения разбора процессов, происходящих в гидроагрегате при АПВС, рассмотрим случай работы одного мощного гидрогенератора (или эквивалентных ему нескольких генераторов) через сравнительно длинную линию электропередачи *) на весьма мощную энергосистему.

Схема АПВС должна запускаться только от электрических защит ЛЭП с высокой стороны повысительной подстанции. При работе гидромеханических и электрических защит гидроагрегата и шин генераторного напряжения схема АПВС блокируется.

При возникновении короткого замыкания на охваченном АПВС участке происходит следующее:

1. Линейная защита отключает линию со стороны системы и со стороны ГЭС.

2. Отключаются автоматы гашения поля генератора (АГП).

3. Запускается схема АПВ линии и схема АПВС генератора.

4. Сбросивший нагрузку гидроагрегат ускоряется, пока вступивший в действие регулятор скорости гидротурбины (РС) не закроет направляющий аппарат (НА).

При успешном АПВ линии появляется напряжение на конце линии со стороны ГЭС.

По достижении гидроагрегатом условий, допускающих его обратное включение в систему, срабатывает схема АПВС и генератор включается способом самосинхронизации (рис. 1). АГП включается лишь по достижении подсинхронной скорости вращения. Генератор набирает доаварийную нагрузку.

Могут быть следующие причины запуска АПВС:

1. Короткое замыкание на объекте, охваченном действием АПВС.

2. Нарушение синхронной работы генератора с системой.

3. Ложное срабатывание защит.

В первом случае, при возникновении короткого замыкания, агрегат сбрасывает часть или всю нагрузку, в зависимости от вида короткого замыкания (КЗ). Схема АПВС работает обычным порядком.

*) Подразумевается линия 110—220 кВ, длиной 150—200 км.

Во втором случае нарушение синхронной работы может произойти в основном из-за потери статической устойчивости (вопрос о динамической устойчивости, благодаря широкому внедрению форсировки возбуждения, сейчас не столь актуален). В таком случае сбрасывается нагрузка, равная разнице между доаварийной мощностью и асинхронной мощностью генератора. В последнее время ряд авторов предлагает в данном случае отключать автомат гашения поля (АГП) с последующей ресинхронизацией без отключения масляного выключателя (МВ) генератора.

К третьему случаю комментариев не требуется, так как он сводится к первому.

Таким образом, процесс АПВС начинается со сброса нагрузки, (в зависимости от вида аварии). Однако, принимая во внимание то, что современные релейные защиты срабатывают за время менее 1 сек., можно приблизительно принять, что сброс нагрузки происходит в момент отключения МВ-генераторного или линейного, в зависимости от принятой схемы.

Вследствие потери нагрузки со стороны генератора, агрегат начнет ускоряться, согласно уравнению движения:

$$M_{\Sigma} + I \frac{d\omega}{dt} = M_{T_{\Sigma}}. \quad (1)$$

Как показывает опыт, в первый момент ускорение агрегата максимально и постоянно. Однако в дальнейшем НА гидротурбины закрывается и ускорение машины начинает уменьшаться. В какой-то момент ускорение меняет знак и агрегат начинает тормозиться.

Вслед за отключением линейного или генераторного МВ отключается и АГП генератора. После сброса нагрузки напряжение в первый момент возрастает и лишь потом снижается.

Включение МВ может произойти при следующих условиях (применительно к крупным гидрогенераторам):

1. Скорость выше номинальной, остаточное напряжение $U_{ост} \approx 0$.
2. Скорость выше номинальной, напряжение на генераторе ниже номинального, но значительно больше остаточного.
3. Скорость номинальная, $U_{ост} \approx 0$.

Третий случай можно не рассматривать, так как он получается при чрезвычайно растянутом цикле АПВС, ничем не отличается от обычной самосинхронизации и нас не интересует. С точки зрения ускорения процесса АПВС более интересны первые два случая, причем второй случай является более общим и поэтому он и будет нами рассмотрен.

При включении МВ генератор, вращающийся со скоростью выше номинальной, начинает тормозиться под влиянием асинхронного момента. Агрегат тормозится также и за счет гидравлического тормозного момента.

При определенных условиях генератор войдет в синхронизм за счет своего реактивного момента или будет вращаться с небольшим скольжением.

Далее, включением АГП возбуждается генератор и он тем самым закрепляется в синхронизме. Открывшийся до прежней величины НА гидротурбины позволяет агрегату набрать доаварийную нагрузку.

III. Пути сокращения цикла АПВС

Из вышесказанного уже видны основные пути сокращения цикла АПВС:

А. Ускорение снижения напряжения:

1. Отключение АГП в момент сброса, чем предотвращается повышение напряжения.
2. Применение быстродействующего АГП с дугогасящей решеткой конструкции з-да „Электросила“ им. С. М. Кирова (разработанного под руководством проф. О.Б. Брона).

Б. Включение МВ при достаточно большом остающемся напряжении (при неполностью погашенном поле).

В. Включение МВ при больших скольжениях (на восходящей части кривой изменения скорости вращения) (рис. 1). Этим, во-первых, сокращается бестоковая пауза генератора, и, во-вторых, быстрее достигается подсинхронная скорость за счет асинхронного торможения.

Г. Гидравлическое торможение развернутыми лопастями рабочего колеса (достигается медленным закрытием лопастей рабочего колеса).

IV. Переходные процессы в генераторе при АПВС

1. Основные исходные уравнения синхронной машины

При исследовании переходных процессов в генераторе используется классическая теория синхронной машины, в основу которой положены уравнения Р. Парка и А. Горева [11], работы Р. А. Лютера [12] и Л. Г. Мамиконянца [6]. При этом делаются следующие упрощения и допущения:

1. Предполагается отсутствие насыщения, кроме специально оговоренных случаев.
2. Отсутствует гистерезис.
3. Железо и обмотка статора симметричны.
4. Магнитный поток и индукция в зазоре машины распределены синусоидально.
5. Реактивности рассеяния машины не зависят от положения ротора по отношению к статору.
6. Отсутствуют токи нулевой последовательности.
7. Процессы в возбудителе не рассматриваются, кроме специально оговоренных случаев.

Схема осей d и q дана на рис. 2. Скольжение принимается $s > 0$ при $\omega < \omega_c$ и $s < 0$ при $\omega > \omega_c^*$.

*) Условные обозначения даны на стр. 288

Основные уравнения синхронной машины, характеризующие переходные процессы в статорных и роторных цепях, можно записать в следующем виде:

$$U_d = -(r + px_d)i_d - p(x_{af}i_f + x_{a1d}i_{1d}) - (1-s)(x_qi_q + x_{a1q}i_{1q}); \quad (2)$$

$$U_q = -(r + px_q)i_q - p(x_{a1q}i_{1q}) + (1-s)(x_d i_d + x_{af}i_f + x_{a1d}i_{1d}); \quad (3)$$

$$U_f = (r_f + px_{ff})i_f + p(x_{af}i_d + x_{f1d}i_{1d}); \quad (4)$$

$$O = (r_{1d} + px_{11d})i_{1d} + p(x_{a1d} \cdot i_d + x_{f1d} \cdot i_f); \quad (5)$$

$$O = (r_{1q} + px_{11q})i_{1q} + p(x_{a1q} \cdot i_q); \quad (6)$$

$$M = i_q i_f x_{af} + i_q i_{1d} x_{a1d} - i_d i_{1q} x_{a1q} - i_d i_q (x_d - x_q) - pT_{MS}. \quad (7)$$

Данная система является нелинейной, но, полагая $s = \text{const}$, что справедливо для больших тихоходных машин, ее можно линеаризировать. Дальнейшее упрощение можно внести, полагая $r = 0$ (r учитывается в таком случае лишь при определении T_d)

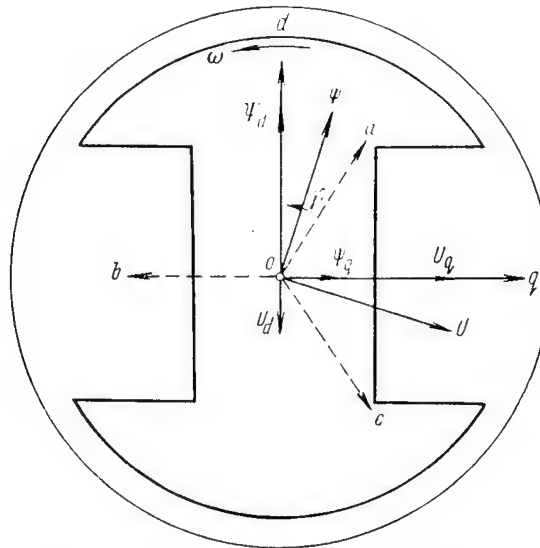


Рис. 2. Схема расположения осей d и q синхронной машины.

В дальнейшем решение приведенных уравнений производится по методике проф. Р. А. Лютера и к. т. н. Л. Г. Мамиконянца [12,6].

Условные обозначения

- a_0 — открытие направляющего аппарата гидротурбины;
- E — э. д. с. генератора;
- i — ток;
- U — напряжение;
- M_T — момент на валу гидротурбины;

M_{ae} — асинхронный момент генератора;
 $M_э$ — электромагнитный момент генератора;
 s — скольжение, положительное при скорости вращения ротора ниже синхронной;
 r — активное сопротивление;
 t — текущее время;
 T — постоянная времени;
 $T_з$ — время закрытия направляющего аппарата гидротурбины;
 T_{μ} — время достижения максимальных оборотов после сброса нагрузки;
 $P_э$ — осевое усиление на валу агрегата;
 J — полярный момент инерции ротора агрегата;
 m — кратность гасительного сопротивления в цепи ротора генератора при отключении АГП-Г;
 ψ — потокосцепление;
 x — реактивное сопротивление;
 φ — угол разворота лопастей рабочего колеса турбины;
 δ — угол между обобщенным вектором напряжения статора и поперечной осью машины;

индексы у букв относятся:

d, q — соответственно к продольной и поперечной оси ротора машины;
 f — к обмотке возбуждения;
 1 — к успокоительным контурам на роторе;
 a — к цепи статора машины;
 o — к постоянным времени при разомкнутом статоре;
 $*$ — возбудителю;
 $'$ — к переходным процессам;
 $''$ — к сверхпереходным процессам.

2. Изменение напряжения генератора после сброса нагрузки

Учитывая быстродействие современной релейной защиты, можно предположить, что к моменту отключения короткого замыкания потокосцепление обмоток и скорость вращения не успеют сколько-нибудь значительно измениться.

АГП генератора*) (АГП-Г) отключается вслед за МВ через время $t_{AGП} = 0,2 \div 0,3$ сек — собственное время срабатывания АГП-Г. При отключении МВ генератора на его выводах напряжение повышается (за счет имевшегося падения напряжения на продольной реактивности машины) на время $t_{AGП}$, т. е. до отключения АГП-Г.

Процесс гашения поля, таким образом, начинается не с номинального напряжения, а с более высокого, в большинстве случаев с $\sim (1,1 \div 1,3) U_n$. Это часто не учитывают, пользуясь при расчете гашения поля кривой гашения поля на холостом ходу. Напряжение на выводах генератора можно определить по приближенной формуле:

$$E_d = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + i_d x_d)^2}, \quad (8)$$

которая учитывает и $\cos \varphi$ предыдущего режима. Зная E_d не трудно определить по характеристике холостого хода генератора U (рис. 3)

Постоянную времени гашения поля можно получить в виде [5]:

$$T_d = T'_{d0} + T_{1d0}, \quad (9)$$

*) или АГП возбудителя, см. ниже.

где T'_{do} — постоянная времени замкнутой на гасительное сопротивление обмотки возбуждения при разомкнутом статоре.

Причем T'_{do} определяется так:

$$T'_{do} = T'_{do} \frac{1}{1 + m}. \quad (10)$$

Однако, как показывает опыт эксплуатации крупных гидрогенераторов (40 мвт и выше), установленные на них контакторы АГП-Г весьма несовершенны и, как правило, после однократного отключения тока ротора при номинальной нагрузке выходят из строя, так как

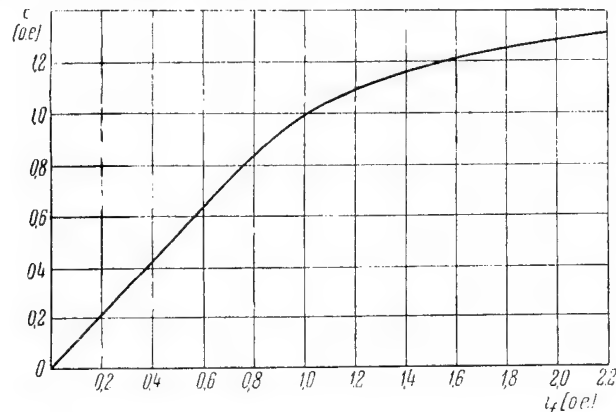


Рис. 3. Характеристика холостого хода генератора типа СВ $\frac{1340}{150}$ 96 (по данным завода „Электросила“ им. С. М. Кирова)

их дугогасильные контакты обгорают. Поэтому в ряде энергосистем (Ленэнерго, Горэнерго, Ростовэнерго) АГП-Г гидрогенераторов отключаются только от электрических защит самого генератора, во всех прочих случаях, в том числе и при АПВС, гашение поля осуществляется АГП возбудителя (АГП-В). Это сильно затягивает процесс гашения поля самого генератора, так как при этом постоянная времени:

$$T_{2(a)} = T'_{do} + T_{ido} + T_{av}, \quad (11)$$

где

T_{av} — постоянная времени возбуждения возбудителя; она соизмерима с T'_{do} генератора.

Например, для гидрогенератора типа СВ $\frac{1340}{150}$ 96 $T'_{do} = 4,33$ сек; $T_{ido} = 0,141$ сек; $T_{av} \approx 5,5$ сек; тогда $T_{2(a)} = 9,97$ сек. Разумеется такая постоянная времени гашения поля приводит к непомерному растягиванию бестоковой паузы генератора при АПВС, что, конечно, недопустимо. Как радикальное средство ускорения гашения поля,

можно рекомендовать установку нового, упомянутого выше, АГП-Г завода „Электросила“. Данный АГП ускоряет гашение в 2—3 раза по сравнению с обычной схемой ХТГЗ.

Однако на большинстве эксплуатируемых ГЭС установлены АГП старого образца и поэтому следует отдельно рассматривать возможность их использования для целей АПВС.

Единственным рациональным способом гашения поля генератора, не повреждая АГП-Г, является отключение последовательно АГП-В и АГП-Г (рис. 4). Импульс на отключение возбуждения следует, таким образом, подавать не на АГП-Г, а на АГП-В. АГП-Г следует отключать при снижении напряжения генератора примерно до $85\% U_n$, что соответствует (по стандартной характеристике холостого хода завода „Электросила“ им. С. М. Кирова, рис. 3) току ротора 0,8 относительных единиц (о. е.).

Если при номинальной нагрузке генератора ток ротора 1,6 о. е., то току 0,8 о. е. соответствует четырехкратное снижение мощности дуги на контактах АГП-Г. Как показал опыт эксплуатации ряда крупных гидрогенераторов, уже при токе ротора $0,8 \div 0,9$ о. е. дугогасящие контакты АГП-Г не выходят из строя. Импульс на отключение АГП-Г в данном случае можно давать от реле напряжения без выдержки времени.

Значение напряжения срабатывания реле (дающего импульс на отключение АГП-Г) $0,85 U_n$ следует, однако, скорректировать с учетом повышения оборотов агрегата.

3. Включение генератора в систему

Выше уже рассматривались различные варианты повторного включения генератора в систему.

Поставленная задача — максимальное сокращение длительности цикла АПВС — требует включения МВ при:

- а) не полностью погашенном поле генератора и
- б) при скорости значительно выше синхронной (рис. 5, 6, 7).

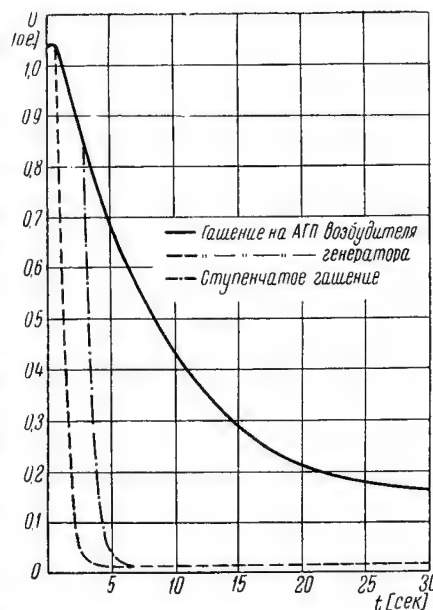


Рис. 4. Процесс гашения поля генератора

Вначале отключается АГП возбуждателя, а при снижении напряжения до $0,85 U_n$ отключается АГП генератора

Постоянные времени:

$$T_{\text{АГП-В}} = 10 \dots 12 \text{ сек.};$$

$$T_{\text{АГП-Г}} = 0,86 \text{ сек.}$$

Техническое управление Министерства электростанций СССР (ТУ МЭС) рекомендует применение АПВС с обратным включением генератора при остаточном напряжении генератора, равном $20\% U_n^*$. С другой стороны, ТУ МЭС рекомендует внедрение АПВ без проверки синхронизма при максимальной сверхпереходной составляющей тока включения, не превышающей 3-кратного номинального тока статора (для гидрогенераторов) [13].

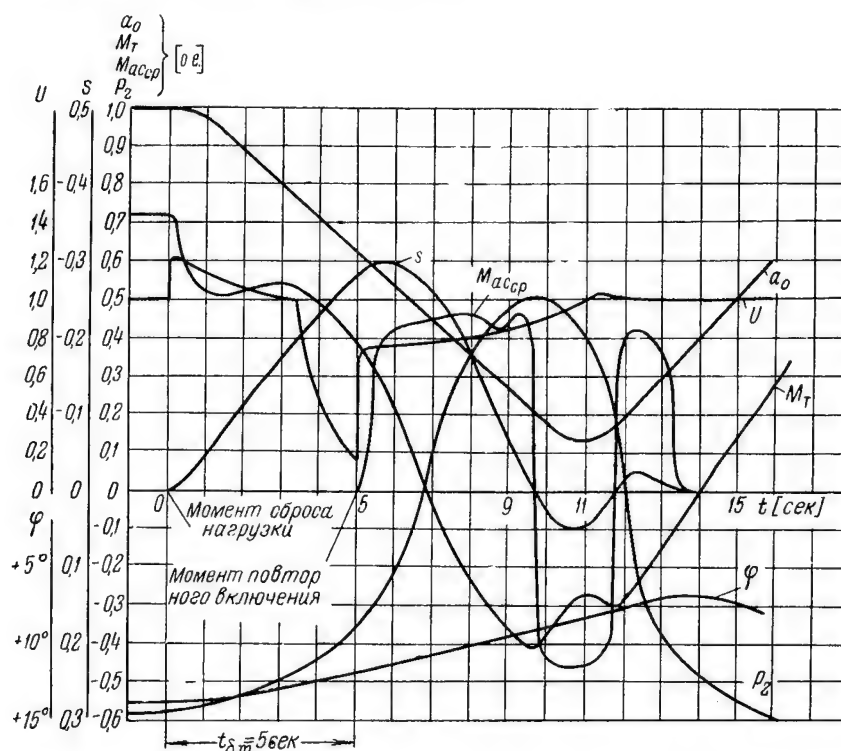


Рис. 5. АПВС при $s = -0,28$ (недостаточно ускоренное)
Длительность бестоковой паузы $t_{б.м.} = 5$ сек.

Сопоставляя эти два условия, приходим к выводу, что могут быть случаи, когда при $U_{ост} = 20\% U_n$ ток включения при несинхронной скорости генератора может быть меньше $3I_n$. Это будет всегда иметь место при наличии достаточно большой реактивности x_c между ГЭС и энергосистемой. Но данная x_c все же недостаточна для введения АПВ б/с, т. е. для включения генератора при $U_{ост} \approx U_n$. С другой стороны, в ряде случаев введение АПВ б/с бывает неже-

*) Предполагается, что при $U_{ост} = 20\% U_n$ максимальный момент несинхронного включения не будет больше максимального момента внезапного трехфазного короткого замыкания на выводах генератора.

лательным из-за возникающих при АПВ б/с сравнительно больших толчках активной мощности во время несинхронного хода возбужденного генератора.

Таким образом, исходя из поставленных ограничений: для АПВС — 20% U_n и для АПВ б/с — 3-кратный ток, следует рассмотреть, при каком $U_{ост}$ можно осуществить обратное включение генератора, не выходя за пределы 3-кратного тока включения.

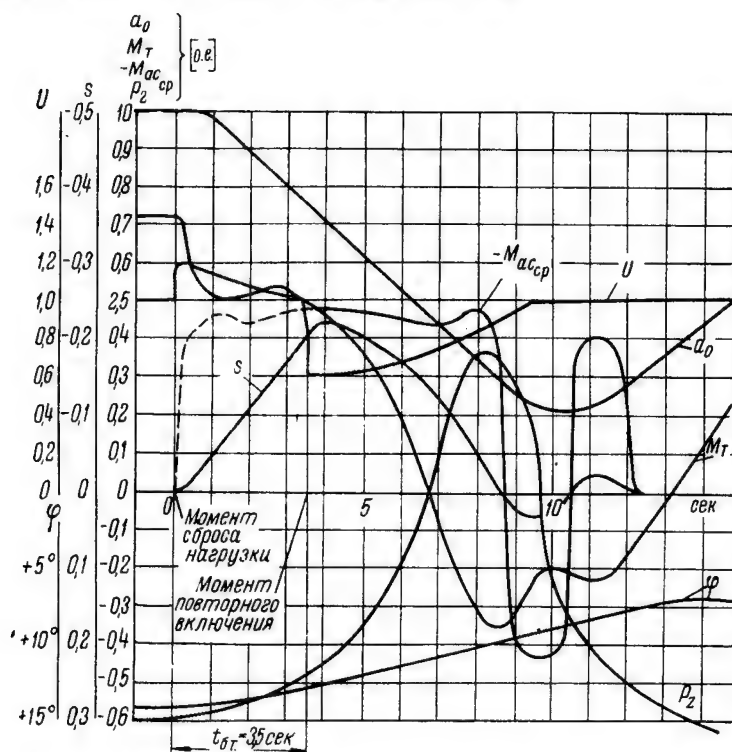


Рис. 6. УАПВС при $s = 0.20$; оптимальный момент включения; длительность бестоковой паузы $t_{ст.м.} = 3.5$ сек.

..... расчетное значение $M_{acp} = f(s)$ при $U_c = 1.0$ е.

Для решения данной задачи необходимо определить ток несинхронного включения при $U < U_n$ в зависимости от U , s и реактивности связи с системой x_c .

Переходный процесс включения возбужденной машины способом самосинхронизации можно рассматривать как наложение двух переходных процессов:

- включения в сеть способом самосинхронизации невозбужденной машины при скольжении s ;
- трехфазного короткого замыкания при напряжении U и скольжении s .

Токи несинхронного включения:

$$i_{nc} = i_{cc} + i_{kз} \quad (12)$$

Так как ограничения даны по току — не более 3-кратного, то остается определить $U_{ост}$ (при данном x_e), при котором $i_{nc} \leq 3i_n$.

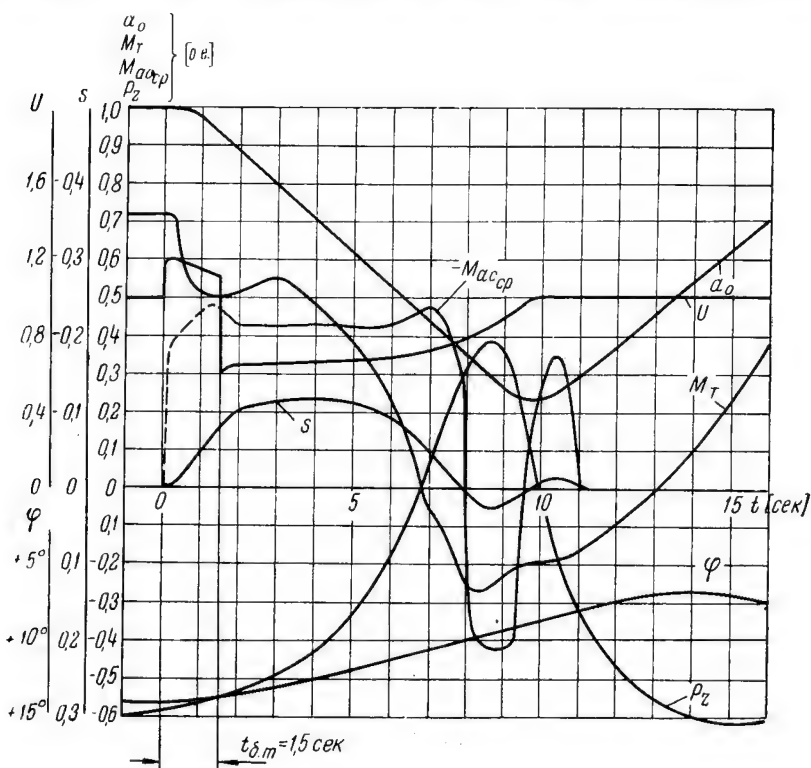


Рис. 7. Чрезмерно ускоренное АПВС при $s = -0,07$;
длительность бестоковой паузы $t_{δ, м.} = 1,5$ сек.

— — — — — расчетное значение $M_{accp} = f(s)$ при $U_e = 1$ о. е.

Максимально возможный ток при самосинхронизации i_{cc} при ожидаемом скольжении можно определить из выражений (13, 14), выведенных для скольжений порядка

$$0,02 < s < 0,40$$

$$i_{d_{ce}} = U \left\{ \frac{1}{x_d''} \cos(\delta_0 - st) + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{1}{s(1-s)T_d'} e^{-\frac{t}{T_d'}} \cos \delta_0 + \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \frac{1}{sT_d''} e^{-\frac{t}{T_d''}} \cos \delta_0 - \frac{1}{x_d} e^{-\frac{t}{T_d}} \cos[\delta_0 + (1-s)t] \right\} \quad (13)$$

$$i_{qcc} = U \left\{ \frac{1}{x_q''} (1-s) \sin(\delta_0 - st) + \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{1}{sT_q''} \sin \delta_0 e^{-\frac{t}{T_q''}} - \right. \\ \left. - \frac{1}{x_q''} s e^{-\frac{t}{T_a}} \sin[\delta_0 + (1-s)t] \right\}. \quad (14)$$

Ток короткого замыкания для сравнительно больших скольжений ($s > 0,05$) можно выразить в упрощенном виде:

$$i_{d_{кз}} = -E \left\{ \frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{(1-s)^2 T_d'^2}{1 + (1-s)^2 T_d'^2} e^{-\frac{t}{T_d'}} + \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \frac{(1-s)^2 T_d''^2}{1 + (1-s)^2 T_d''^2} e^{-\frac{t}{T_d''}} - \frac{1}{x_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(1-s)t \right\}; \quad (15)$$

$$i_{q_{кз}} = -E \left\{ \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{(1-s)^2 T_q''^2}{1 + (1-s)^2 T_q''^2} e^{-\frac{t}{T_q''}} - \right. \\ \left. - \frac{s}{x_q''} e^{-\frac{t}{T_a}} \sin(1-s)t \right\}. \quad (16)$$

Тогда суммарный ток несинхронного включения генератора с э. д. с. $E (= U_{ocm})$ на систему с напряжением U :

$$i_{d_{nc}} = \left[\frac{U \cos(\delta_0 - st)}{x_d''} - \frac{E}{x_d} \right] + \\ + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \left(\frac{U \cos \delta_0}{s(1-s)T_d'} - \frac{E(1-s)^2 T_d'^2}{1 + (1-s)^2 T_d'^2} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \\ + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \left(\frac{U \cos \delta_0}{sT_d''} - \frac{E(1-s)^2 T_d''^2}{1 + (1-s)^2 T_d''^2} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \frac{1}{x_d''} E \cos(1-s)t - \\ - U \cos[\delta_0 + (1-s)t] e^{-\frac{t}{T_a}}; \quad (17)$$

$$i_{q_{nc}} = \frac{U}{x_q''} (1-s) \sin(\delta_0 - st) + \\ + \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \left(\frac{U \sin \delta_0}{sT_q''} - \frac{E(1-s)^2 T_q''^2}{1 + (1-s)^2 T_q''^2} \right) e^{-\frac{t}{T_q''}} + \\ + \frac{s}{x_q''} (E \sin(1-s)t - U \sin[\delta_0 + (1-s)t]) e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (18)$$

Данные выражения можно еще упростить, полагая

$$\frac{(1-s)^2 T^2}{1+(1-s)^2 T^2} \approx 1, \quad (19)$$

что дает при $s < 0,50$ и $T \gg 1$ незначительную погрешность.

Тогда (17 и 18) переписутся в виде:

$$\begin{aligned} i_{dnc} = & \left[\frac{U \cos(\delta_0 - st)}{x_d''} - \frac{E}{x_d} \right] + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \left(\frac{U \cos \delta_0}{s(1-s) T_d'} - E \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \\ & + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \left(\frac{U \cos \delta_0}{s T_d''} - E \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \\ & + \frac{1}{x_d''} (E \cos(1-s)t - U \cos[\delta_0 + (1-s)t]) e^{-\frac{t}{T_d''}}; \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{qnc} = & \frac{U}{x_q''} (1-s) \sin(\delta_0 - st) + \left(\frac{1}{x_q'} - \frac{1}{x_q} \right) \left(\frac{U \sin \delta_0}{s T_q'} - E \right) e^{-\frac{t}{T_q'}} + \\ & + \frac{s}{x_q''} (E \sin(1-s)t - U \sin(\delta_0 - (1-s)t)) e^{-\frac{t}{T_q''}}. \quad (21) \end{aligned}$$

Нас интересует сверхпереходная периодическая составляющая тока $\frac{i_{dnc}}{s}$ в момент $t = 0$ в зависимости от E и s .

Выберем наихудший случай $\delta_0 = \pi$, тогда $st = 0$ и $\cos \delta_0 = -1$ и

$$\begin{aligned} i_{dnc, \max} = & \left[-\frac{U}{x_d''} - \frac{E}{x_d} \right] + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \left(-\frac{U}{s(1-s) T_d'} - E \right) + \\ & + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \left(-\frac{U \cos \delta_0}{s T_d''} - E \right). \quad (22) \end{aligned}$$

Следует подчеркнуть, что при расчетах необходимо пользоваться значениями x и T , учитывающими реактивность генератора, повысительного трансформатора и линии электропередачи до приемных шин системы, напряжение которых (U_c) принимаем равным единице (см. рис. 8).

Момент при включении генератора способом самосинхронизации с неравным нулю остаточным напряжением (несинхронное включение), в отличие от токов, не является простой суммой моментов самосинхронизации M_{cc} и короткого замыкания $M_{кз}$.

По выражению (7) имеем:

$$M_{nc} = i_{qnc} \psi_{dnc} - i_{dnc} \psi_{qnc}, \quad (23)$$

где

$$\begin{aligned} i_{dnc} &= i_{d_{cc}} + i_{d_{кз}}; & i_{qnc} &= i_{q_{cc}} + i_{q_{кз}}; \\ \psi_{dnc} &= \psi_{d_{cc}} + \psi_{d_{кз}}; & \psi_{qnc} &= \psi_{q_{cc}} + \psi_{q_{кз}}. \end{aligned}$$

Тогда

$$M_{nc} = M_{cc} + M_{кз} + \Delta M_{nc}, \quad (24)$$

где

$$\Delta M_{nc} = (i_{q_{cc}} \psi_{d_{кз}} + i_{q_{кз}} \psi_{d_{cc}}) - (i_{d_{cc}} \psi_{q_{кз}} + i_{d_{кз}} \psi_{q_{cc}}). \quad (25)$$

Используя упомянутые выражения для токов самосинхронизации (13 и 14) и короткого замыкания (15 и 16), а также выражения

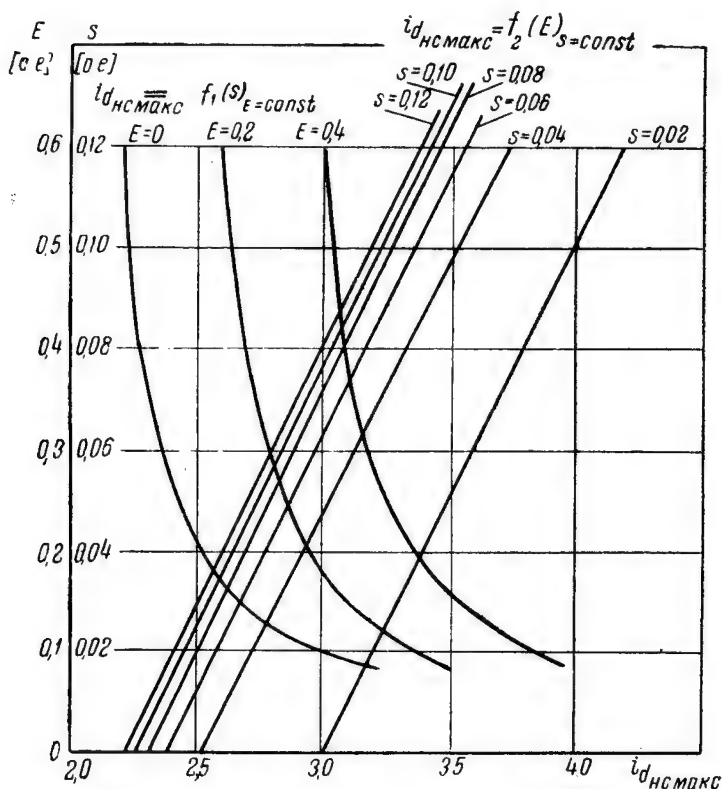


Рис. 8. Максимальный ток несинхронного включения $i_{d_{nc.макс}}$ в зависимости от э. д. с. E генератора и скольжения s . Расчетные условия: ротор генератора замкнут на разрядное сопротивление АГП генератора; реактивность связи с системой учтена; $U_c = 1$ о. е.

потокосцеплений при самосинхронизации:

$$\psi_d = U \left\{ \cos(\delta_0 - st) - e^{-\frac{t}{T_a}} \cos[\delta_0 + (1 - s)t] \right\}, \quad (26)$$

$$\psi_q = U \left\{ \sin(\delta_0 - st) - e^{-\frac{t}{T_a}} \sin[\delta_0 + (1 - s)t] \right\}, \quad (27)$$

и при коротком замыкании:

$$\psi_d = E_q e^{-\frac{t}{T_d}} \cos(1-s)t, \quad (28)$$

$$\psi_q = E_q e^{-\frac{t}{T_d}} \sin(1-s)t, \quad (29)$$

можно, опуская ряд выкладок, получить:

$$\begin{aligned} \Delta M_{uc} = UE \Big\{ & \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \sin(\delta_0 - st) - \\ & - \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-\frac{t}{T''_q}} \cos(\delta_0 - st) - \left[\frac{1}{x_d} e^{-\frac{t}{T_d}} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{T'_d + T_d}{T'_d \cdot T_d} t} + \right. \\ & \quad \left. + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{T''_d + T_d}{T''_d \cdot T_d} t} \right] \sin[\delta_0 + (1-s)t] + \\ & \quad + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-\frac{T''_q + T_d}{T''_q \cdot T_d} t} \cos[\delta_0 - (1-s)t] - \\ & - \frac{1}{x''_q} e^{-\frac{t}{T''_q}} \cos(1-s)t \sin(\delta_0 - st) - \frac{1}{x'_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} \cos(\delta_0 - st) \sin(1-s)t + \\ & + \frac{s}{x'_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} \sin(1-s)t \cos(\delta_0 - st) + \frac{1-s}{x''_q} e^{-\frac{t}{T''_q}} \sin(\delta_0 - st) \cos(1-s)t - \\ & - \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{e^{-\frac{T'_d + T_d}{T'_d \cdot T_d} t}}{s(1-s)T'_d} \cos \delta_0 + \right. \\ & \quad \left. + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \frac{e^{-\frac{T''_d + T_d}{T''_d \cdot T_d} t}}{sT''_d} \cos \delta_0 \right] \sin(1-s)t + \\ & + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{e^{-\frac{T''_q + T_d}{T''_q \cdot T_d} t}}{sT''_q} \sin \delta_0 \cos(1-s)t - \left[\left(\frac{x'_d - x''_d}{x_d^2(1-s)T''_d} + \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \frac{x_q - x''_q}{(1-s)x_q x''_q} \right) \cos \delta_0 + \left(\frac{1}{x_d} - \frac{s}{x''_q} \right) \sin[\delta_0 + 2(1-s)t] \right] e^{-\frac{2t}{T_d}} \Big\}. \quad (30) \end{aligned}$$

Остальные два члена выражения (24) могут быть записаны в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 M_{cc} = U^2 \Big\{ & -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{1}{s T'_d} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \frac{1}{s T''_d} + \right. \\
 & \left. + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{1}{s T''_q} \right] - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \sin 2(\delta_0 - st) + \\
 & + \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{e^{-\frac{t}{T'_d}}}{s(1-s) T'_d} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \frac{e^{-\frac{t}{T''_d}}}{s(1-s) T''_d} \right] \sin \delta_0 \sin(\delta_0 - st) + \\
 & + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{e^{-\frac{t}{T''_q}}}{s(1-s) T''_q} \cos \delta_0 \cos(\delta_0 - st) + \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{1}{(1-s) T'_d} + \right. \\
 & \left. + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \frac{1}{(1-s) T''_d} + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{1}{(1-s) T''_q} \right] e^{-\frac{2t}{T_a}} - \\
 & - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{2t}{T_a}} \sin [\delta_0 + (1-s)t] + \\
 & + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \sin [2\delta_0 - (1-2s)t] - \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{e^{-\frac{T'_d + T_a}{T'_d T_a} t}}{s(1-s) T'_d} + \right. \\
 & \left. + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \frac{e^{-\frac{T''_d + T_a}{T''_d T_a} t}}{s(1-s) T''_d} \right] \sin \delta_0 \sin [\delta_0 + (1-s)t] - \\
 & - \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{e^{-\frac{T''_q + T_a}{T''_q T_a} t}}{s(1-s) T''_q} \cos \delta_0 \cos [\delta_0 + (1-s)t] \Big\}; \quad (31)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{\kappa\beta} = E^2 \Big\{ & \left[\frac{1}{x_d} e^{-\frac{t}{T_a}} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{T'_d + T_a}{T'_d T_a} t} + \right. \\
 & \left. + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{T''_d + T_a}{T''_d T_a} t} \right] \sin(1-s)t -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-\frac{T_q'' \cdot T_a}{T_q'' T_a} t} \cos(1-s)t - \frac{e^{-\frac{2t}{T_a}}}{2x_d''} \sin 2(1-s)t + \\
& + \frac{e^{-\frac{2t}{T_a}}}{2x_q''} (1-s) \sin 2(1-s)t + \frac{1}{2} \left(\frac{x_d' - x_d''}{x_d^2 (1-s) T_{d0}} + \frac{x_q - x_q''}{(1-s) x_q x_q''} \right) e^{-\frac{2t}{T_a}} \}. \quad (32)
\end{aligned}$$

Возникающий максимальный момент при несинхронном включении не должен превосходить максимального момента трехфазного короткого замыкания на выводах генератора (на который генератор рассчитывается при его проектировании).

Л. Г. Мамиконянц [6] считает возможным определять максимальный $M_{кл}$, без учета затухания, по (33) или (34)

$$M_{кл} \approx E^2 \left[\frac{1}{x_d''} \sin(1-s)t - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2(1-s)t \right], \quad (33)$$

или при $t = 0$

$$M_{кл, макс} \approx E^2 \left[\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_q''} \right) \right]. \quad (34)$$

Максимально возможный момент самосинхронизации, без учета затухания в момент $t = 0$, можно записать упрощенно для выявления влияния скольжения:

$$\begin{aligned}
M_{сс, макс} = U^2 \left\{ \left[\left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{1}{T_d'} + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \frac{1}{T_d''} + \right. \right. \\
\left. \left. + \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{1}{T_q''} \right] \left(\frac{1}{2s} + \frac{1}{1-s} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_q''} \right) \right\}. \quad (35)
\end{aligned}$$

Максимальное возможное значение дополнительного момента несинхронного включения, записанное без учета затухания ($t = 0$ и $\delta_0 = 180^\circ$):

$$\Delta M_{нс, макс} = UE \left\{ 2 \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) - \left(\frac{x_d' - x_d''}{x_d^2 T_{d0}} + \frac{x_q - x_q''}{x_q x_q''} \right) (1-s) \right\}. \quad (36)$$

Суммируя эти три компонента, можно получить зависимость максимального момента несинхронного включения (например, при $U_c = 1$ и $E = 1$) от скольжения, показанную на рис. 9. (расчет произведен с учетом реактивности связи с системой):

$$M_{нс, \mathcal{M}} = M_{сс, \mathcal{M}} + M_{кл, \mathcal{M}} + \Delta M_{нс, \mathcal{M}}.$$

Как видно (рис. 8 и 9), максимальное значение тока несинхронного включения $i_{дне}$ и максимальное значение момента $M_{нс}$ убывают с увеличением скольжения. Следовательно, если включение, например, при $s = 1 \div 2_{/0}^{0/0}$ и соответствующем E_d , недопустимо по условиям

максимального тока и максимального момента, то при каком-то $s \gg s_{кр}$ значение тока и момента находятся в допустимых пределах.

Таким образом, расчетный момент для повторного включения следует выбирать, исходя из следующих условий:

$$\begin{aligned} 1) i_{нс.м} &< 3i_n \\ 2) M_{нс.м} &< M_{кл} \end{aligned} \quad (37)$$

Из предыдущего ясно, что первое условие вносит большие ограничения, чем второе при выборе времени АПВС. Необходимо, на основании материалов натурных испытаний генераторов, определить, исходя из допустимых усилий и вибраций в гидрогенераторе, конкретные нормы по допустимым моментам и токам в машине для АПВС и аналогичных процессов. Действующие же в данное время нормы требуют уточнения как в сторону общего увеличения допускаемых токов при АПВС, так и дифференциации по отдельным типам генераторов. Так, например, гидрогенератор с полной демпферной обмоткой на роторе испытывает значительно меньшие усилия от моментов, как это показывает Л. Г. Мамиконянц [6], чем без демпферной обмотки. Повысив допустимый ток несинхронного включения для гидрогенераторов с полной демпферной обмоткой, приравняв этим самым их к турбогенераторам с массивным ротором, можно также значительно сократить время АПВС.

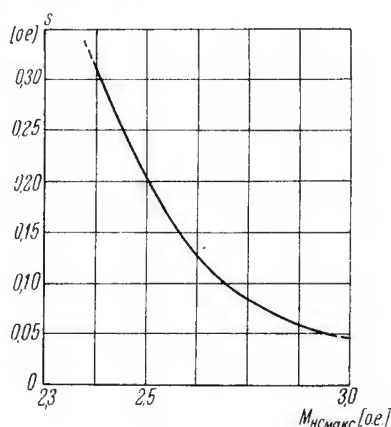


Рис. 9. Максимальный момент несинхронного включения $M_{нс.м.к.к.}$ генератора в зависимости от скольжения s .

Рсактивность связи с системой учтена.

Максимальный момент внезапного короткого замыкания (трехфазного) на выводах генератора при $U = 1$ о. е. равно $M_{к.з.м.к.к.} = 5,2$ о. е.

V. Изменение скорости гидроагрегата после сброса нагрузки и выбор момента АПВС

В результате потери нагрузки генератора в момент отключения МВ, агрегат будет ускоряться. Как следствие этого, регулятор скорости (РС) гидротурбины начнет закрывать НА гидротурбины. (Для мощных низконапорных гидротурбин время закрытия НА обычно около $8 \div 14$ сек.) Момент на валу агрегата начнет уменьшаться, и при некотором открытии НА становится тормозным.

Как показывает опыт и расчет, наиболее удобно выбирать такой момент для повторного включения (при выполнении условия (37) предыдущего раздела), который соответствует равенству момента

турбины M_T среднему установившемуся асинхронному моменту генератора $M_{асер}$, при данном s на валу агрегата:

$$M_T = -M_{асер}; \quad \text{т. е.} \quad M_T + M_{асер} = 0.$$

Упрощенная методика расчета гидродинамического процесса при АПВС разработана автором *).

Для расчета процесса АПВС, начиная с момента включения МВ, необходимо знать соотношение моментов на валу агрегата.

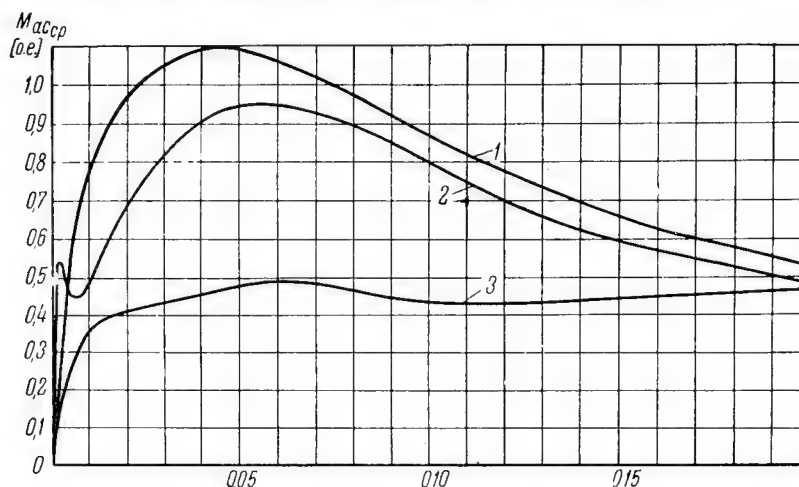


Рис. 10. Асинхронные характеристики генератора СВ $\frac{1340}{150}$ 96:

- 1 — АГП-Г отключено; напряжение на зажимах генератора $U = 1$ о. е.
 2 — АГП-Г включено; напряжение на зажимах генератора $U = 1$ о. е.
 3 — АГП-Г отключено; учтена реактивность связи с системой; напряжение приемных шин системы $U_e = 1$ о. е.

Асинхронный момент $M_{асер}$ можно рассчитать по выражению (38):

$$M_{асер} = \frac{U^2}{2} \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{sT'_d}{1 + (sT'_d)^2} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \frac{sT''_d}{1 + (sT''_d)^2} + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{sT''_q}{1 + (sT''_q)^2} \right]^{**}). \quad (38)$$

Зависимость установившегося асинхронного момента от скольжения дана на рис. 10 для различных условий расчета: кривые 1 и 2 даны без учета реактивности связи с системой, при напряжении на зажимах генератора $U_e = 1$ о. е. Кривые 1 и 3 построены

*) Методика расчёта динамики ускоренного АПВС. Находится в печати.

**) Выражение (38) аналогично таковому в работе Л. Г. Мамиконянца [6]

для ротора генератора, замкнутого на разрядное сопротивление АГП-Г, кривая 2 — для закороченного ротора. Кривая 3 рассчитана с учетом реактивности связи с системой, при напряжении приемных шин системы $U_c = 1$ о. е. Момент M_T на валу турбины получен экспериментальным путем из натурных испытаний методом тензометрирования [15] крутильных деформаций вала агрегата.

Как показано автором, нетрудно эмпирически определить зависимость

$$M_T = f(a_o)$$

в процессе закрытия НА после сброса нагрузки. Для этого необходимо поставить стандартный опыт сброса номинальной нагрузки с простейшими измерениями, фиксируя следующие величины:

- 1) максимальную скорость вращения;
- 2) время T_n достижения максимальных оборотов [сек];
- 3) время T_z полного закрытия НА [сек].

Расчет удобнее вести в относительных единицах. За базисные величины лучше всего принимать параметры генератора: номинальную активную мощность генератора, номинальную скорость вращения (отсюда номинальный момент на валу агрегата), открытие НА, соответствующее номинальной мощности.

(Могут быть два случая: $M_T < 1$ при $a_{oH} = 1$ при пониженном напоре и $M_T = 1$ при $a_{oH} < 1$ при повышенном напоре. За номинальное a_{oH} принимается a_o , соответствующее $M_T = 1$).

VI. Некоторые гидродинамические процессы в гидроагрегате при АПВС

При сбросе нагрузки из-за быстрого закрытия НА в спиральной камере гидротурбины происходит повышение давления [14, 15]. Исходя из этого и дается заводом-изготовителем гидротурбины максимально допустимая скорость закрытия НА. Однако, как выяснилось, более опасным является возникающее при сбросе нагрузки, направленное вверх, осевое усилие на валу агрегата [15]. При сбросе номинальной нагрузки осевое усилие может достигать в ряде случаев 80% и более веса вращающихся частей агрегата. Если учесть, что при этом возникает знакопеременная составляющая осевого усилия в $\pm 30\%$ веса вращающихся частей, то выясняется, что ротор агрегата может оторваться от подпятника и „подпрыгнуть“. Такие „подпрыгивания“, приводящие в некоторых случаях к авариям, имели место в отечественной практике.

Если обратиться к [15] и имеющемуся у автора экспериментальному материалу, а также к рис. 1, 5 и 6, то ясно, что возникающее осевое усилие P_z является функцией скорости n вращения и открытия НА. P_z увеличивается с ростом n и с уменьшением открытия НА, так как турбина оказывается в данном случае в насосном режиме. При ускоренном АПВС (УАПВС) агрегат, в результате асинхронного торможения, не достигает той максимальной скорости вращения, которую он может достигнуть при простом сбросе нагрузки,

а в соответствии с этим и P_z не достигает своего максимального значения. Снижению пика P_z способствует также и неполное закрытие НА, который начинает открываться, как только скорость агрегата снизится до подсинхронной скорости, или точнее — ниже уставки механизма изменения числа оборотов (МИЧО) в РС гидротурбины.

В приведенном на рис. 6 случае НА не закрывает более, чем до $28 \div 30\%$.

Таким образом, при использовании УАПВС, устраняется возможность возникновения опасных для гидроагрегата направленных вверх осевых усилий (рис. 1, 5, 6, 7).

Заключение

1. Ускоренное АПВС (УАПВС) является, по сравнению с другими способами АПВ, прогрессивным способом, дающим большие возможности широкого внедрения АПВ и значительно сокращающим бестоковую паузу генератора (в 3—4 раза). Например, для крупного тихоходного гидрогенератора (~ 60 т *квт*) одной из ГЭС УАПВС обуславливает бестоковую паузу генератора $t_{\text{бм}} \approx 4 \div 5$ сек против $t_{\text{бм}} \approx 14 \div 15$ сек для АПВС на подсинхронной скорости (см. рис. 1 и 6). Таким образом, УАПВС позволяет быстрым восстановлением потерянной энергосистемой генерирующей мощности отключившейся ГЭС значительно ускорить ликвидацию аварии и предотвратить более глубокое снижение частоты в энергосистеме.

2. Полученные выражения для токов и моментов, при несинхронном включении генератора, можно использовать для точного расчета процесса УАПВС. Выведенные из них упрощенные формулы позволяют наглядно оценить зависимость $M_{\text{нс}}$ и $i_{\text{днс}}$ от скольжения и остаточного напряжения генератора. Как выяснилось, ток несинхронного включения $i_{\text{днс}}$ уменьшается с увеличением скольжения s и уменьшением остаточного напряжения (э. д. с.) генератора E (рис. 8). $M_{\text{нс}}$ показывает такую же зависимость от s и E .

3. Рассматривая установленные Техуправлением МЭС ограничения для АПВС по $U_{\text{ост}} = 0,20U_n$ и для АПВ б/с по $i_{\text{нс}} = 3i_n$, можно определить, что условие по $3i_n$, хотя и более обосновано, и дает более широкие возможности применения АПВ, все же не удовлетворяет современным требованиям.

Необходимо пересмотреть ограничения ТУ МЭС по току, повысив для гидрогенераторов с полной демпферной обмоткой на роторе максимально допустимый ток до 4—5-кратного (как это сейчас сделано для турбогенераторов), или вообще, отказавшись от ограничения по току (или напряжению), поставить ограничение по максимальному моменту $M_{\text{нс}}$, определив его как

$$M_{\text{нс м}} \leq (0,8 \div 1,0) M_{\text{кз м}}$$

Такая постановка вопроса строже и обоснованнее. Учитывая имеющуюся литературу, в частности, и данную работу, а также возросшую квалификацию инженеров-эксплуатационников ГЭС, можно полагать

что в проведении расчета момента $M_{нс.ж}$ при УАПВС не возникнет особых трудностей.

4. Из рассмотренных путей сокращения цикла АПВС наиболее эффективным путем (для гидрогенератора с полной демпферной системой) является применение асинхронного торможения генератора с включением МВ на восходящей части кривой скорости.

5. Оптимальным моментом включения выключателя, как удалось установить, является мгновение, когда равны момент гидротурбины M_T и противодействующий ему асинхронный момент $M_{ас.р}$ генератора. При более раннем включении МВ увеличивается длительность асинхронного хода без значительного ускорения вхождения генератора в синхронизм. При более позднем включении МВ получается незначительное сокращение асинхронного хода, но зато увеличивается бестоковая пауза генератора.

6. Гидромеханические процессы в гидроагрегате при УАПВС не носят сколько-либо опасного для агрегата характера. Величина максимального направленного вверх осевого усилия в 2—3 раза меньше такового при обычном сбросе нагрузки. Это же относится и к повышению давления в спиральной камере, и к давлению над рабочим колесом гидротурбины.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Сыромятников, Значение способа самосинхронизации Труды ЦНИЭЛ, вып. IV, ГЭИ, 1956.
2. А. В. Иванов-Смоленский, Л. Г. Мамиконянц, В. Н. Недельку, А. С. Степунина, Экспериментальное исследование режимов АПВС генераторов, работающих на дальние линии электропередач. Труды ЦНИЭЛ, вып. IV, ГЭИ, 1956.
3. А. С. Степунина, Ю. М. Элькин, Схемы АПВ с самосинхронизацией линией 400 кв, Труды ЦНИЭЛ, вып. II, 1954.
4. Схемы АПВС генераторов, ОАТН Гидроэнергопроекта, Москва, 1954.
5. И. А. Сыромятников, Режимы работы синхронных генераторов, ГЭИ, 1952.
6. Л. Г. Мамиконянц, Токи и моменты вращения, возникающие в синхронной машине при включении ее способом самосинхронизации, Труды ЦНИЭЛ, IV, ГЭИ, 1956.
7. И. А. Сыромятников, Применение способа самосинхронизации, для включения синхронных машин на параллельную работу, „Электричество“ № 8, 1954.
8. Информационные материалы Ленэнерго, ГЭИ, 1956.
9. О расширении области применения АПВ б/с для линий передач (Хроника ТУ МЭС), „Электрические станции“, № 9, 1955.
10. С. А. Ульянов, Короткие замыкания в электрических системах, ГЭИ, 1952.
11. А. А. Горев, Переходные процессы синхронной машины, ГЭИ, 1950.
12. Р. А. Лютер, Теория переходных режимов синхронных машин с применением операторного анализа, Ленинградский энергомашиностроительный институт усовершенствования ИТР, Ленинград, 1939.
13. Циркуляр техуправления МЭС СССР, № Э-5/55 от III 1955.
14. Отчёт „Гидромеханические испытания гидроагрегата № 2“, № 111047, Ленфилиал Гидропроекта, Ленинград, 1956.
15. Отчёт „Гидромеханические испытания, II цикл, испытания по пуску, самосинхронизации и АПВС“ № 118004, Ленфилиал Гидропроекта, Ленинград, 1957.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. К 60-летию со дня рождения и 33-летию научно-педагогической деятельности А. В. Фатеева в Ленинградском электротехническом институте имени В. И. Ульянова (Ленина)	3
2. Список важнейших научных трудов профессора А. В. Фатеева	5
3. Р. И. Юргенсон. Методы обеспечения пассивной помехоустойчивости избирательных систем с шаговой синхронизацией	7
4. В. И. Анисимов. Переходные и частотные характеристики фазочувствительных выпрямителей с реостатно-емкостной нагрузкой	21
5. В. Б. Смоллов, Н. А. Смирнов. Расчёт точности электро-механического интегратора и некоторые возможные способы её повышения	34
6. В. А. Олейников. Работа магнитного усилителя в импульсной системе регулирования или управления	46
7. В. Д. Барышников. Дифференциальная обратная связь в системах автоматического управления и регулирования с электромашиными и магнитными усилителями	58
8. В. А. Олейников. Графический анализ переходных процессов в нелинейных системах при импульсном режиме их работы	71
9. П. И. Сайдов. Устойчивость движения силовых гироскопических стабилизаторов	79
10. Л. И. Байда, Г. В. Одинцов, С. С. Рыбак. Преобразование постоянного тока в переменный при помощи контактных преобразователей с безыскровой коммутацией	88
11. А. В. Башарин. Графический метод синтеза систем автоматического управления	98
12. Н. П. Ермолин. Стабилизация скорости вращения мало-мощных электродвигателей постоянного тока	133
13. М. Г. Кузнецов. К вопросу линеаризации сопротивления щеточного контакта в ЭМУ	143
14. Б. В. Шамрай. Оптимальные геометрические размеры торoidalных сердечников	149
15. Н. И. Осипов. Влияние емкостной связи на работу индукционного датчика при повышенной несущей частоте	156
16. В. Н. Рудаков, Г. Я. Муравьёва. О влиянии магнитных полей на форму поверхности жидкого алюминия в электролизных ваннах для получения алюминия	172
17. К. И. Крылов. Об одном методе генерирования электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов	188
18. С. И. Молоковский. Условия фокусировки электронного потока в аксиально симметричном магнитном поле при неэкранированной от магнитного поля электронной пушке	200

	Стр
19. Е. Д. Пигулевский. Структура поля пьезоизлучателя в ультразвуковом микроскопе	213
20. П. В. Пономарев. Опытная установка для видения ультразвукового поля	224
21. А. Г. Граммаков, В. М. Орлов, В. П. Антонов. Нейтрализатор статического электричества для плоскочечатных типографских машин	229
22. А. П. Крассовский. Кооперация серийных полуфабрикатных цехов с поточным сборочным или комплексный непрерывный поток?	233
23. К. В. Булгаков. О выборе оптимальных параметров и структуры проектируемых теплоэлектрических станций	246
24. С. И. Мягкова. Электрическое торможение гидрогенераторов с целью обеспечения возможности трехфазного автоматического повторного включения одиночной линии	264
25. Е. А. Хагемейстер. Ускоренное автоматическое повторное включение с самосинхронизацией крупных гидрогенераторов (УАПВС)	282

Ответственный редактор *И. П. Богородицкий*

Технические редакторы *П. А. Иванов* и *В. И. Евсеев*

Сдано в производство 31/X 1958 г. Подписано к печати 7/V 1958 г. М-04373
Формат бумаги $60 \times 92 \frac{1}{16}$ Печ. л. 19,25 + 3 вклейки. Уч.-изд. л. 20.
Тираж 500 экз. Заказ № 2535. Цена 10 руб.

Типография № 2 им. Евг. Соколовой УПП Ленсовнархоза.
Ленинград, Измайловский пр., 29

STAT

Page Denied

STAT

**ИЗВЕСТИЯ
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА
имени В. И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)**

Выпуск XXXV

**ЛЕНИНГРАД
1958**

STAT

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени В. И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

ИЗВЕСТИЯ
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА
имени В. И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

ВЫПУСК XXXV

(Год издания 56-й)

ЛЕНИНГРАД
1958

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Доктор технических наук, профессор Н. П. Богородицкий (ответственный редактор); заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Д. В. Васильев; доктор геолого-минералогических наук, профессор А. Г. Грамаков; инженер В. И. Евсеев (секретарь); доктор технических наук, профессор Н. П. Ермолин; кандидат технических наук, доцент Г. В. Одинцов (председатель); доктор технических наук, профессор С. И. Панфилов; кандидат технических наук, доцент А. А. Потсар; доктор технических наук, профессор А. В. Фремке.

Докт. техн. наук, проф. Н. П. ЕРМОЛИН

К ВОПРОСУ ОБОБЩЕННОГО РАССМОТРЕНИЯ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Как известно, принцип действия электрических машин базируется на двух основных законах электричества и магнетизма, действующих в машине одновременно: законе электромагнитной индукции и законе электромагнитного взаимодействия проводника с током и магнитного поля. На основе этих законов в электрической машине происходит преобразование механической энергии в электрическую, или электрической энергии в механическую, или же электрической энергии одного вида в электрическую энергию другого вида. В этом смысле электрическая машина в принципе не является источником энергии, а представляет собой простой преобразователь одного вида энергии в другой. Поэтому при работе электрической машины генератором или двигателем к ней всегда должна подводиться механическая или электрическая энергия от постороннего источника. Количественная связь между подводимой к машине механической энергией и получаемой от нее электрической, или наоборот, определяется внутренним электромагнитным моментом электрической машины, выражение для которого независимо от типа машины имеет следующий вид

$$\begin{aligned} M &= A\Phi_1 I_2 \sin(\Phi_1, I_2) = kA W_1 A W_2 \sin(A W_1, A W_2) = \\ &= kA W_1 A W_2 \sin \gamma = kA W_1 A W_{2q}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $A W_1$ — первичная м.д.с., представляющая систему возбуждения машины;

$A W_2$ — вторичная м.д.с., выражающая собой реакцию вторичной системы на первичную;

$A W_{2q}$ — поперечная составляющая реакции;

γ — постоянный пространственный угол сдвига между первичной и вторичной м.д.с.

По закону сохранения и превращения энергии внутренний электромагнитный момент машины обеспечивает равновесие между механической и электрической мощностями в системе, без чего невозможно было бы преобразование в ней механической энергии в электрическую или обратно.

На рис. 1 представлены пространственные диаграммы первичных и вторичных м.д.с. AW_1 и AW_2 разных типов электрических машин: машины постоянного тока, синхронной и асинхронной машин, рекуперационного и трехфазного коллекторных двигателей и трансформатора. При этом во всех случаях пространственный угол γ между направлениями м.д.с. AW_1 и AW_2 является по-

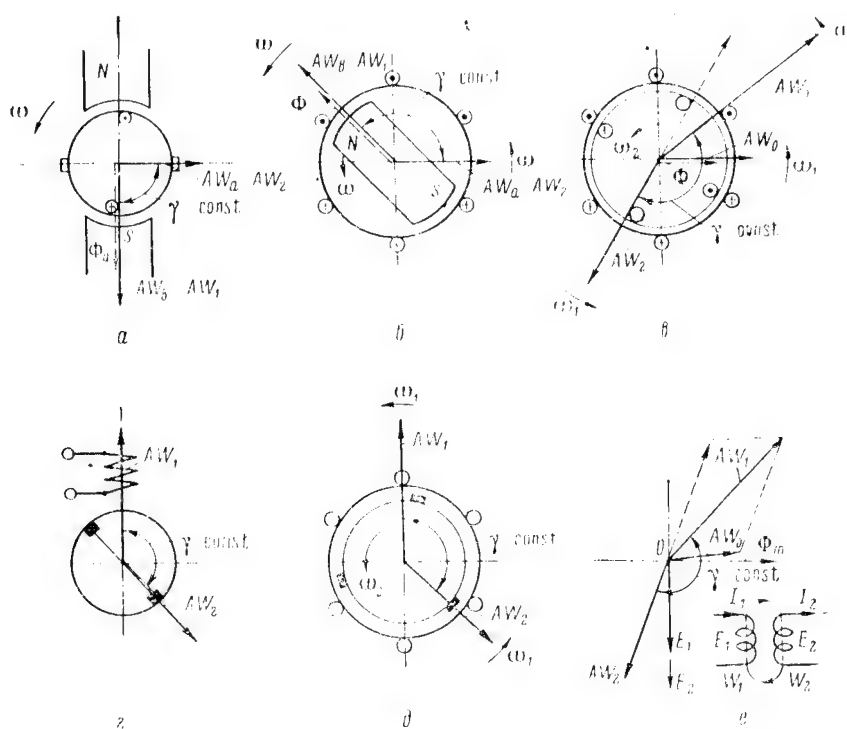


Рис. 1. Пространственные диаграммы м.д.с. электрических машин:
а — машина постоянного тока; б — синхронная машина; в — асинхронная машина; г — рекуперационный двигатель; д — трехфазная коллекторная машина; е — трансформатор

стоянным. Другими словами, при установившемся режиме работы любой электрической машины положение м.д.с. AW_1 и AW_2 относительно друг друга остается неизменным, а положение их в про-

странстве зависит от типа машины. В машинах постоянного тока, однофазных коллекторных и репульсионных двигателях и в трансформаторах эти м.д.с. неподвижны в пространстве, а в синхронных, асинхронных и трехфазных коллекторных машинах они вращаются с постоянной синхронной скоростью $n = \frac{60f}{p}$, пропорциональной частоте получаемого или подводимого тока f и обратно пропорциональной числу пар полюсов машины p .

Как показывают уравнение (1) и диаграммы рис. 1, в основе принципа действия всех электрических машин лежит взаимодействие двух пространственно сдвинутых систем м.д.с. AW_1 и AW_2 , создаваемых неподвижной и вращающейся частями машины. Следовательно, с точки зрения принципа действия все электрические машины являются «реактивными» машинами. Так называемая «реакция якоря» в них AW_2 является не только неизбежной, но и существенно необходимой для образования в машине электромагнитного момента, который в генераторах является тормозящим, а в двигателях — вращающим моментом. Ни одной из этих взаимодействующих в машине м.д.с. AW_1 и AW_2 нельзя уничтожить совсем, а можно лишь перераспределить или изменить в ту или иную сторону. Однако механизм действия машины от этого перераспределения м.д.с. принципиально не меняется, лишь бы поперечная составляющая реакции не равнялась нулю. В этом отношении уравнение (1) просто объясняет, например, отсутствие вращающего момента у двигателя постоянного тока или репульсионного при сдвиге щеток на коллекторе с геометрической нейтральной на 90 электрических градусов, или отсутствие момента у трехфазного коллекторного двигателя при сдвиге щеток его с положения холостого хода на 180 электрических градусов. Во всех этих случаях угол сдвига между первичной и вторичной магнитодвижущими силами AW_1 и AW_2 оказывается равным 180° и, следовательно, никакого взаимодействия между ними не будет, так как поперечная составляющая реакции равна нулю.

Далее, как показывает уравнение (1), для получения в машине при установившемся режиме работы постоянного по величине и направлению электромагнитного момента нужно, чтобы при неизменных значениях м.д.с. AW_1 и AW_2 пространственный угол между ними γ был постоянным и неравным нулю или 180°. В связи с этим вторым необходимым условием действия электрической машины является коммутация, под которой в общем случае следует понимать способ сохранения или восстановления угла γ между м.д.с. AW_1 и AW_2 . Иначе говоря, под термином «коммутация» должна подразумеваться вся совокупность средств, обеспечивающая непрерывность вращения ротора.

Так например, в машинах постоянного тока, однофазных коллекторных и репульсионных двигателях под коммутацией пони-

мается процесс изменения направления тока в секциях обмотки якоря, замыкаемых накоротко щетками в момент перехода их через геометрическую нейтраль из одной параллельной ветви в другую. Этим путем, как известно, обеспечивается неизменное направление токов в соседних параллельных ветвях, благодаря чему сохраняются неизменными величина и направление в пространстве м.д.с. реакции якоря AW_2 . Ввиду этого при определенном положении щеток на коллекторе угол γ между неподвижной в пространстве первичной м.д.с. AW_1 и реакцией якоря AW_2 остается постоянным и электромагнитный момент получается одного знака. Этот момент, действуя в одном направлении, обеспечивает непрерывность вращения якоря в двигательном режиме работы машины.

В синхронных, асинхронных и трехфазных коллекторных машинах под коммутацией следует понимать свойство многофазных обмоток создавать при обтекании их многофазным переменным током результирующую м.д.с. неизменной амплитуды и вращающуюся относительно этих обмоток с постоянной синхронной скоростью. Ввиду этого в синхронных машинах угол γ между вращающимися в пространстве с синхронной скоростью магнитодвижущими силами ротора и статора AW_1 и AW_2 при установившемся режиме работы будет оставаться неизменным.

Если ротор синхронной машины будет вращаться несинхронно с м.д.с. статора, например, при выпадении его из синхронизма при работе машины с сетью, то угол γ и электромагнитный момент будут переменного знака за один оборот ротора, так что результирующая величина момента становится равной нулю. Это обстоятельство физически объясняет отсутствие начального момента у синхронного двигателя с возбужденным ротором при включении его статора в сеть.

В асинхронных и трехфазных коллекторных машинах угол γ между AW_1 и AW_2 также сохраняется неизменным благодаря синхронному вращению в пространстве м.д.с. ротора AW_2 вследствие алгебраического суммирования в пространстве скоростей вращения ротора и м.д.с. его относительно самого ротора.

Наконец, в трансформаторах с первичной и вторичной обмотками на общем сердечнике коммутация в обычном смысле слова, как процесс переключения тока, отсутствует и постоянство угла γ между м.д.с. этих обмоток AW_1 и AW_2 обеспечивается здесь неподвижностью самих обмоток относительно друг друга.

Рассматривая принцип действия электрической машины, следует отметить, что уравнение (1) для электромагнитного момента ее, выражая собой явление взаимодействия, определяет энергетическую сторону процесса преобразования в машине одного вида энергии в другой. Электрическую сторону этого процесса выра-

жает электродвижущая сила в обмотке машины, общее уравнение для эффективного значения которой имеет следующий вид

$$E = 4 k_f k'_w f W \Phi \cdot 10^{-8} [\text{в}], \quad (2)$$

где $k_f = 1,10 \dots 1,12$ — коэффициент формы кривой э.д.с.;
 k'_w — обмоточный коэффициент;
 f — частота, гц ;
 W — число витков обмотки;
 Φ — магнитный поток, мкс .

Из этого уравнения, как частные случаи, могут быть получены все известные выражения для э.д.с. разных типов электрических машин и трансформаторов. Так, например, для разных обмоток получается:

а) обмотка якоря машины постоянного тока

$$E = \frac{pn}{60} \frac{N}{a} \Phi_a \cdot 10^{-8} [\text{в}],$$

так как

$$k_f = k'_w = 1; \quad f = \frac{pn}{60}; \quad W = \frac{N}{4a},$$

б) обмотка статора синхронной машины

$$E = 4 k_f k'_w f W_\phi \Phi_a \cdot 10^{-8} [\text{в}];$$

в) обмотки статора и ротора асинхронной машины

$$E_1 = 4,44 k'_w f_1 W_1 \Phi \cdot 10^{-8} [\text{в}];$$

$$E_{2s} = 4,44 k'_w f_1 s W_2 \Phi \cdot 10^{-8} [\text{в}],$$

где s — скольжение; $k_f = 1,11$;

г) первичная и вторичная обмотки трансформатора

$$E_1 = 4,44 f W_1 \Phi_m \cdot 10^{-8} [\text{в}];$$

$$E_2 = 4,44 f W_2 \Phi_m \cdot 10^{-8} [\text{в}],$$

так как $k_f = 1,11$; $k'_w = 1$.

Э.д.с. соответствующей обмотки и ток в рабочем режиме машины определяют величину внутренней электромагнитной мощности ее, которая так же, как и электромагнитный момент, только в другой форме, выражает количественную связь между преобразуемыми в машине механической и электрической энергиями. Со-

отношение между электромагнитной мощностью и моментом машины определяется известным уравнением

$$P_e = M\omega, \quad (3)$$

где M — электромагнитный момент машины, дж ;
 ω — угловая скорость вращения поля или якоря, $[\text{1/сек}]$.

Уравнение (3) выражает собой равновесие между электрической и механической мощностями машины в процессе преобразования в ней одного вида энергии в другой.

Выводы

Таким образом, анализ пространственных диаграмм м.д.с. электрических машин и выражения для внутреннего электромагнитного момента их показывают, что в основе принципа действия всех электрических машин независимо от их типа лежит взаимодействие двух пространственно сдвинутых систем м.д.с. неподвижной и вращающейся частей машины и соответствующая коммутация в ней. Взаимодействие м.д.с. и коммутация определяют в машине электромагнитный момент постоянного направления, обеспечивающий непрерывность вращения ротора ее в двигательном режиме работы и постоянное равновесие между электрической мощностью машины и механической мощностью приводного двигателя ее — в генераторном режиме.

Поступила 10/II 1957 г.

Докт. техн. наук, проф. Н. П. ЕРМОЛИН

ОСНОВЫ РАСЧЕТА МАЛОМОЩНОЙ РЕВЕРСИВНОЙ УСТАНОВКИ С БОЛЬШИМ МАХОВЫМ МОМЕНТОМ НА ВАЛУ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Введение

В некоторых областях техники встречаются маломощные реверсивные установки мощностью до нескольких десятков или сотен ватт с относительно большим маховым моментом на валу исполнительного электродвигателя и с частотой реверса порядка 0,3—5 гц или несколько более. Обычно это установки постоянного тока специального назначения.

Питание реверсивного исполнительного электродвигателя такой установки может осуществляться или от относительно мощного источника постоянного тока с релейным способом реверсирования напряжения на зажимах якоря электродвигателя, или же от электромашиного усилителя с поперечным полем соизмеримой мощности с реверсированием выходного напряжения током управления. В обоих случаях исполнительный электродвигатель имеет постоянное независимое возбуждение (рис. 1).

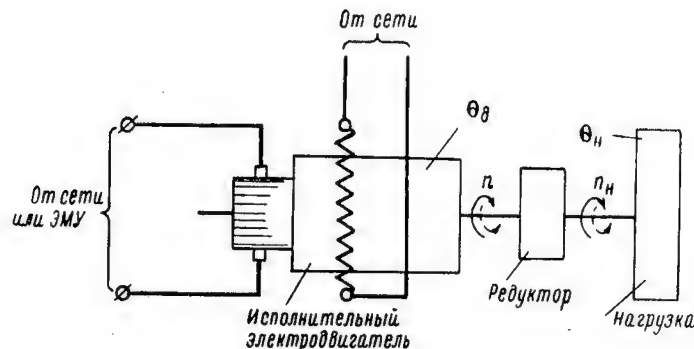


Рис. 1. Схема реверсивной установки

При реверсивной работе исполнительного электродвигателя этой установки нагрузка на его валу, с большим моментом инерции, обычно совершает через редуктор колебательные движения относительно оси вала с частотой порядка 0,3—5 гц или более и амплитудой размаха в пределах некоторого заданного сектора с углом α_0 (рис. 2). При этом характер изменения колебания нагрузки за полупериод его определяется видом заданного графика работы установки. Эти графики могут быть приблизительно трапецеидального или же синусоидального характера. На рис. 2 сплошной линией представлен один из желаемых трапецеидальных видов графика работы установки, а пунктиром показан возможный реальный график изменения скорости вращения вала нагрузки за полупериод реверса двигателя.

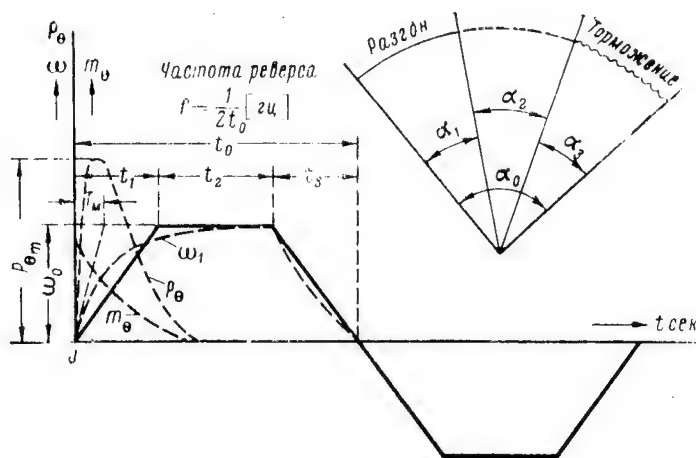


Рис. 2. Трапецеидальный график изменения скорости вращения нагрузки на валу исполнительного электродвигателя

На рис. 3 представлен синусоидальный график изменения этой скорости. За полупериод реверса двигатель после разгона достигает своей установившейся скорости вращения, а затем происходит его торможение. Нагрузка же за этот полупериод описывает только часть дуги окружности, соответствующую углу α_0 . Ввиду этого механическая связь вала исполнительного двигателя с валом нагрузки при таком режиме работы осуществляется через редуктор с определенным передаточным числом.

Расчет составных элементов такой маломощной реверсивной установки, в особенности ее исполнительного электродвигателя, не получил еще достаточного освещения в литературе. Как показано

ниже, основные размеры исполнительного электродвигателя данной установки зависят от ряда факторов, а именно: вида графика изменения скорости вращения вала нагрузки при реверсивной работе, величины момента инерции нагрузки, угла размаха колебания ее, электромеханической постоянной времени системы и др.

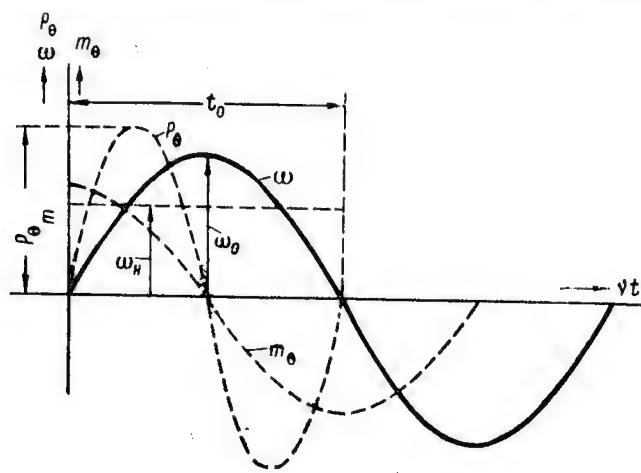


Рис. 3. Синусоидальный график изменения скорости вращения нагрузки на валу исполнительного электродвигателя

Ниже излагаются основы расчета маломощной реверсивной установки постоянного тока с относительно большим маховым моментом на валу исполнительного электродвигателя в зависимости от различных факторов, определяющих ее работу.

1. Основные соотношения в реверсивной установке с трапецидальным графиком изменения скорости вращения вала нагрузки

Если принять график изменения скорости колебания нагрузки за полупериод $t_0 = \frac{1}{2f}$ в виде трапеции (рис. 2), с временем разгона t_1 , участком постоянной скорости в течение времени t_2 и временем торможения t_3 , то в действительности следует иметь в виду, что разгон исполнительного электродвигателя с инерционной нагрузкой на валу до установившейся угловой скорости вращения нагрузки ω_0 за время t_1 будет происходить по экспоненциальному закону с электромеханической постоянной времени

$$T_m \cong \frac{1}{3} t_1 \text{ [сек]}. \quad (1)$$

В связи с этим уравнения угловых скоростей на участках разгона и торможения по пунктирному графику рис. 2 будут

$$\omega_1 = \omega_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right); \quad \omega_3 = \omega_0 e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (2)$$

Углы положения нагрузки в секторе α_0 за время: разгона, приблизительно постоянной скорости и торможения будут (рис. 2):

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 + \alpha_2 &= \int_0^{t_1+t_2} \omega_1 dt = \int_0^{t_1+t_2} \omega_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}}\right) dt \sim \omega_0 \left(\frac{2}{3} \cdot t_1 + t_2\right); \\ \alpha_3 &= \int_0^{t_3} \omega_3 dt = \int_0^{t_3} \omega_0 e^{-\frac{t}{T_m}} dt \sim \frac{1}{3} \omega_0 t_1. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Следовательно, угол сектора колебания нагрузки будет

$$\alpha_0 = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = \omega_0(t_1 + t_2) \text{ [радианов]},$$

откуда наибольшая угловая скорость вращения вала нагрузки (рис. 2) получается

$$\omega_0 = \frac{\alpha_0}{t_1 + t_2} = \frac{2 \alpha_0 f}{1 - \xi_3} \text{ [1/сек.]}, \quad (4)$$

где $\xi_3 = \frac{t_1}{t_0}$ — относительное время торможения системы;
 f — частота реверса двигателя, гц.

Средняя угловая скорость вращения этого вала за время t_0 будет

$$\omega_n = \frac{\alpha_0}{t_0} = 2 \alpha_0 f \text{ [1/сек.]}. \quad (5)$$

Максимальная скорость вращения вала нагрузки будет

$$n_n = \frac{60 \omega_0}{2 \pi} = \frac{60 \alpha_0 f}{\pi(1 - \xi_3)} \text{ [об/мин.]}. \quad (6)$$

Как указывалось выше, механическая связь между валами исполнительного электродвигателя и нагрузки осуществляется через редуктор с передаточным числом

$$k = \frac{n}{n_n}, \quad (7)$$

ввиду этого установившаяся скорость вращения электродвигателя будет

$$n = k n_n. \quad (8)$$

Электромеханическая постоянная времени системы, численно определяемая (1), может быть представлена известным уравнением

$$T_m = \Theta \frac{\omega}{M_n} \leq \frac{1}{3} t_1, \quad (9)$$

где $\Theta = \Theta_\partial + \Theta'_n$ — общий момент инерции маховых масс якоря исполнительного электродвигателя и нагрузки, приведенный к валу двигателя, $\Gamma \text{ см сек}^2$;
 Θ_∂ — момент инерции якоря двигателя, $\Gamma \text{ см сек}^2$;
 $\Theta'_n = \Theta \frac{1}{k^2}$ — момент инерции нагрузки, приведенный к валу двигателя, $\Gamma \text{ см сек}^2$;
 $\omega = k\omega_0$ — установившаяся угловая скорость вращения двигателя, $1/\text{сек}$;
 k — передаточное число редуктора по (7);
 t_1 — время разгона системы, сек. (рис. 2).

Пусковой момент исполнительного электродвигателя будет

$$M_n = M_o + M_n + M_0 \quad [\Gamma \text{ см}], \quad (10)$$

где M_o — момент сопротивления механических и магнитных потерь исполнительного двигателя, $\Gamma \text{ см}$;
 M_n — статический момент сопротивления нагрузки, приведенный к валу двигателя, $\Gamma \text{ см}$;
 M_0 — наибольшее значение момента ускорения при разгоне системы, $\Gamma \text{ см}$.

Мгновенное значение момента ускорения при разгоне системы, с учетом (2),

$$\begin{aligned} m_0 &= \left(\Theta_\partial + \Theta_n \frac{1}{k^2} \right) \frac{d\omega_1}{dt} k = \left(\Theta_\partial + \Theta_n \frac{1}{k^2} \right) k \frac{\omega_0}{T_m} e^{-\frac{t}{T_m}} = \\ &= M_0 e^{-\frac{t}{T_m}}, \end{aligned} \quad (11)$$

где наибольшее значение момента ускорения при $t = 0$

$$M_0 = \frac{\omega_0}{T_m} \left(\Theta_\partial k + \Theta_n \frac{1}{k} \right) \quad [\Gamma \text{ см}]. \quad (11a)$$

Как показывает уравнение (11a), наибольший момент ускорения при разгоне системы зависит от передаточного числа редуктора k . Этот момент будет минимальным при определенном значении передаточного числа редуктора, получаемом из условия $\frac{dM_0}{dk} = 0$. В этом случае из (11a)

$$\frac{dM_0}{dk} = \frac{\omega_0}{T_m} \left(\Theta_\partial - \Theta_n \frac{1}{k^2} \right) = 0,$$

откуда наивыгоднейшее значение передаточного числа редуктора

$$k = \sqrt{\frac{\Theta_n}{\Theta_d}}. \quad (12)$$

Следовательно, при этом условии приведенный к валу исполнительного двигателя момент инерции нагрузки

$$\Theta_n' = \Theta_n \frac{1}{k^2} = \Theta_d$$

и минимальный момент ускорения в начале пуска системы при $t = 0$ из (11а) будет

$$M_{0\min} = \frac{\omega_0}{T_m} (\Theta_d + \Theta_n') \sqrt{\frac{\Theta_n}{\Theta_d}} = \frac{2\omega_0}{T_m} \sqrt{\Theta_d \Theta_n} \quad [л\cdot см] \quad (13)$$

и минимальное мгновенное значение этого момента по (11)

$$m_{0\min} = M_{0\min} e^{-\frac{t}{T_m}} \quad [л\cdot см]. \quad (13a)$$

Мгновенное значение наименьшей мощности ускорения при разгоне системы, с учетом (2), (12) и (13а), будет

$$p_0 = 9,81 m_{0\min} \omega_1 k \cdot 10^{-5} = P'_{0m} \left(e^{-\frac{t}{T_m}} - e^{-\frac{2t}{T_m}} \right), \quad (14)$$

где

$$P'_{0m} = \frac{2}{T_m} \cdot 9,81 \Theta_n \omega_0^2 \cdot 10^{-5} \quad [вт]. \quad (14a)$$

Наименьшая средняя мощность ускорения за время разгона системы t_1 на основании (4), (14) и (14а) будет

$$P_0 = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} p_0 dt = \frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} P'_{0m} \left(e^{-\frac{t}{T_m}} - e^{-\frac{2t}{T_m}} \right) dt = \frac{0,8}{\xi_1(1-\xi_1)^2} \Theta_n \omega_0^2 f^3 \cdot 10^{-3} \quad [вт], \quad (15)$$

где $\xi_1 = \frac{t_1}{t_0}$ — относительное время разгона системы.

Максимальная мощность ускорения системы (рис. 2) будет в момент времени, определяемый из условия

$$\frac{dp_{\theta}}{dt} = P'_{\theta m} \left(-\frac{1}{T_m} e^{-\frac{t}{T_m}} + \frac{2}{T_m} e^{-\frac{2t}{T_m}} \right) = 0,$$

откуда

$$t_m = 2,3 T_m \log 2 = 0,7 T_m \quad (16)$$

и величина максимальной мощности ускорения системы, на основании уравнений (14), (14а) и (15), получается

$$P_{\theta m} = 0,25 P'_{\theta m} = 0,25 \cdot 6 P_{\theta} = 1,5 P_{\theta} [вт], \quad (17)$$

т. е. в 1,5 раза больше средней мощности ускорения за время разгона системы.

Как показывает (15), самая минимальная средняя мощность ускорения системы $P_{\theta \text{ мин}}$ получается при наибольшем времени разгона системы t_1 , которое может достигать величины $t_1 = 0,8 t_0$ и более (рис. 2). На рис. 4 представлена кривая относительного

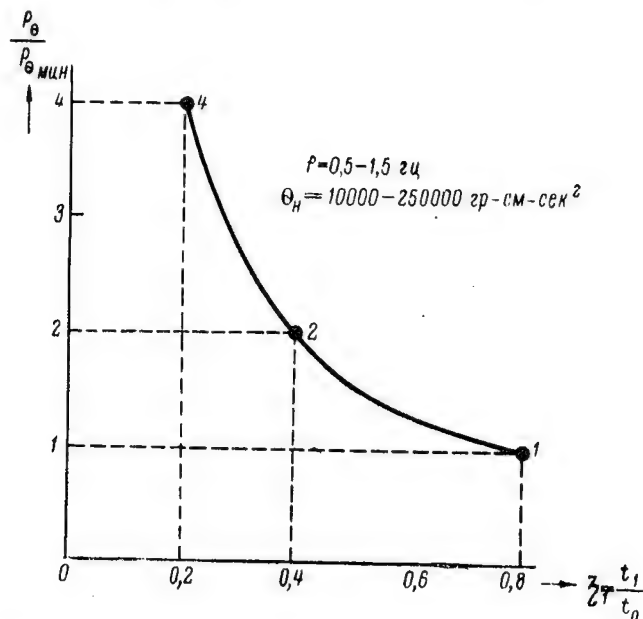


Рис. 4. Зависимость относительного значения средней мощности ускорения от времени разгона исполнительного электродвигателя при трапецидальном графике работы

значения средней мощности ускорения в долях минимальной мощности $P_{0, \text{мин}}$ в зависимости от относительного времени разгона двигателя. Как показывает рис. 4, чем меньше относительное время разгона двигателя $\xi_1 = \frac{t_1}{t_0}$, тем больше получается мощность ускорения. Далее, из (15) следует, что средняя мощность ускорения P_0 зависит от величины момента инерции нагрузки Θ_n , квадрата угла размаха колебания нагрузки α_0 и куба частоты реверсирования системы f . Если, исходя из понятия рассматриваемой маломощной реверсивной установки, ограничиться величиной предельной мощности ее в период пуска не более $P_{\text{макс}} = 1000 \text{ вт}$, то по (15) можно определить предельные допустимые значения моментов инерции нагрузки в зависимости от частоты реверсирования и вида графика изменения скорости вращения. На рис. 5 представлены кривые относительного значения средней мощности ускорения по (15) в долях условной мощности $P_{\text{макс}} = 1000 \text{ вт}$ в зависимости от частоты реверса исполнительного двигателя при разных постоянных значениях момента инерции нагрузки и времени разгона и неизменном угле размаха колебания нагрузки $\alpha_0 = \frac{\pi}{3}$. Как показывает рис. 5, с увеличением частоты реверса и небольшим времени разгона двигателя происходит значительное возрастание средней мощности ускорения при данном моменте инерции нагрузки. Эти кривые позволяют определить предельные значения момента инерции нагрузки при указанных значениях, времени разгона и разных частотах реверса системы.

2. Основные соотношения в реверсивной установке с синусоидальным графиком изменения скорости вращения вала нагрузки

При синусоидальном изменении скорости колебания нагрузки за период $2t_0$ (рис. 3) уравнение угловой скорости будет

$$\omega = \omega_0 \sin \nu t. \quad (18)$$

Угол сектора колебания нагрузки за полупериод будет

$$\alpha_0 = \int_0^{t_0} \omega dt = \int_0^{t_0} \omega_0 \sin \nu t = \frac{2 \omega_0 t_0}{\pi} \text{ [радианов]}, \quad (19)$$

где $\nu = 2\pi f = \frac{\pi}{t_0}$ — угловая частота колебания нагрузки.

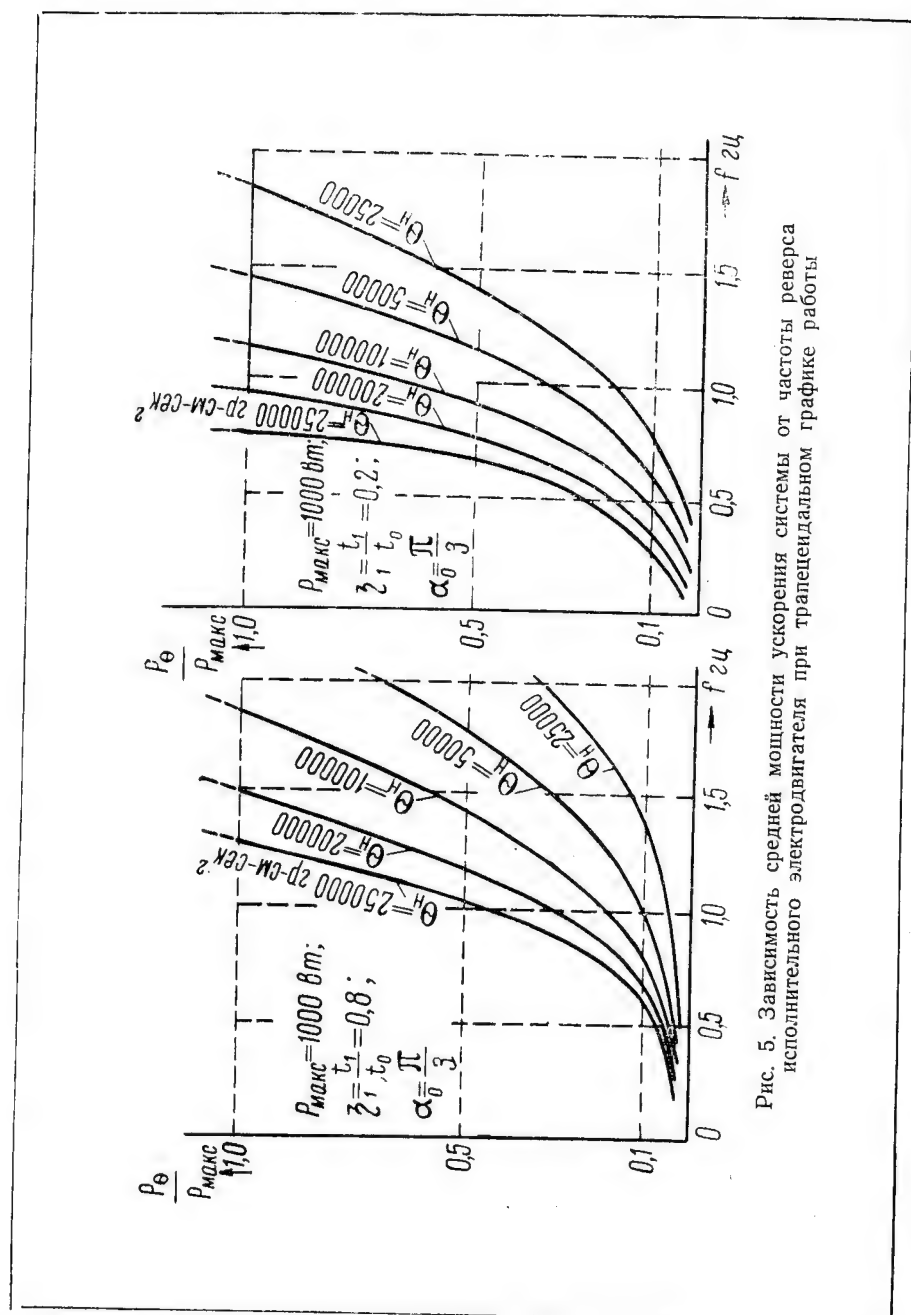


Рис. 5. Зависимость средней мощности ускорения системы от частоты реверса исполнительного электродвигателя при трапецидальном графике работы

Наибольшая угловая скорость вращения вала нагрузки из (19)

$$\omega_0 = \frac{\pi z_0}{2t_0} = \pi z_0 f \text{ [1/сек.]}, \quad (20)$$

где f - частота реверса двигателя, $гц$.

Средняя угловая скорость вращения вала нагрузки за время t_0

$$\omega_n = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \omega dt = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \omega_0 \sin \nu t dt = \frac{2\omega_0}{\pi} = \frac{z_0}{t_0} = 2z_0 f \text{ [1/сек.]}. \quad (21)$$

Максимальная скорость вращения вала нагрузки

$$n_n = \frac{60}{2\pi} \omega_0 = 30 z_0 f \text{ [об/мин.]}. \quad (22)$$

Мгновенное значение момента ускорения при разгоне системы, с учетом (18)

$$m_{\theta} = \left(\Theta_d + \Theta_n \frac{1}{k^2} \right) \frac{d\omega}{dt} k = \left(\Theta_d + \Theta_n \frac{1}{k^2} \right) k \omega_0 \nu \cos \nu t = M_{\theta} \cos \nu t, \quad (23)$$

где минимальная амплитуда момента ускорения будет при передаточном числе, определяемом (12)

$$M_{\theta_{мин}} = \omega_0 \nu \left(\Theta_d + \Theta_n \frac{1}{k^2} \right) \sqrt{\frac{\Theta_n}{\Theta_d}} = 2 \omega_0 \nu \sqrt{\Theta_d \Theta_n} \text{ [Гсм]} \quad (24)$$

и минимальное мгновенное значение этого момента по (23)

$$m_{\theta_{мин}} = M_{\theta_{мин}} \cos \nu t. \quad (24a)$$

Мгновенное значение наименьшей мощности ускорения при разгоне системы, с учетом (12), (18) и (24a), будет

$$p_{\theta} = 9,81 m_{\theta_{мин}} \omega k \cdot 10^{-5} = 9,81 \omega_0^2 \Theta_n 10^{-5} \cdot \sin 2 \nu t = P_{\theta_m} \sin 2 \nu t, \quad (25)$$

где амплитуда мощности ускорения (рис. 3)

$$P_{\theta_m} = 9,81 \omega_0^2 \Theta_n \cdot 10^{-5}. \quad (25a)$$

Наименьшая средняя мощность ускорения за время разгона системы $\frac{t_0}{2}$, на основании (20), (25) и (25а), будет

$$P_{\theta} = \frac{2}{t_0} \int_0^{\frac{t_0}{2}} p_{\theta} dt = \frac{2P_{\theta m}}{t_0} \int_0^{\frac{t_0}{2}} \sin 2\gamma t dt =$$

$$= \frac{2}{\pi} P_{\theta m} = 4\pi \alpha_0^2 f^3 \cdot 10^{-3} [вт]. \quad (26)$$

Следовательно, амплитуда этой мощности

$$P_{\theta m} = \frac{\pi}{2} P_{\theta} \quad (27)$$

или в 1,57 раза больше средней мощности ускорения за время разгона системы.

Как и в случае трапецидального графика работы установки, на рис. 6 представлены кривые относительного значения средней мощности ускорения по уравнению (26) в долях условной мощности $P_{\text{макс}} = 1000 \text{ вт}$ при синусоидальном графике работы в зависимости от частоты реверса исполнительного двигателя при разных постоянных значениях момента инерции нагрузки и неизменном угле размаха колебания ее $\alpha_0 = \frac{\pi}{3}$. Сравнение кривых рис. 5 и 6 показывает, что при реверсивной работе установки по синусоидальному графику требуемая от исполнительного электродвигателя величина средней мощности ускорения при определенном моменте инерции нагрузки находится в пределах между значениями ее при реверсивной работе установки по трапецидальному графику с относительным временем разгона 0,2 и 0,8.

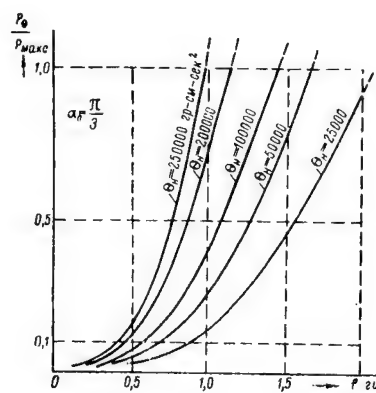


Рис. 6. Зависимость средней мощности ускорения системы от частоты реверса исполнительного электродвигателя при синусоидальном графике работы

3. Определение основных размеров реверсивного исполнительного электродвигателя

Как известно, под основными размерами электродвигателя постоянного тока понимаются диаметр и длина якоря D_a и l_0 , которые определяются по формуле машинной постоянной

$$C = \frac{6 \cdot 10^8}{\gamma AS B_0} = \frac{D_a^2 l_0 n}{P_a}. \quad (28)$$

Здесь α , AS и B_0 — коэффициент полюсного перекрытия, линейная нагрузка якоря и индукция в воздушном зазоре — являются известными величинами.

Так как исполнительный электродвигатель рассматриваемой малоомощной реверсивной установки при частотах реверса порядка 0,5—5 *гц* практически работает в непрерывном неустановившемся режиме, то для определения основных размеров его нужно в величину расчетной или габаритной мощности двигателя P_a включать также и среднюю мощность ускорения системы по уравнениям (15) или (26). В этом случае расчетная мощность реверсивного исполнительного двигателя будет

$$P_a = P_o + P + P_0 = P_a' + P_0 = \xi P_0 \text{ [вт]}, \quad (29)$$

где

$$P_a' = P_o + P = \frac{1 + 2 \eta}{3 \eta} P$$

— часть расчетной мощности двигателя, соответствующая полезной мощности нагрузки на валу его P ;

P_0 — средняя мощность ускорения системы по (15) или (26);

η — к.п.д. двигателя, соответствующий мощности P ;

$$\xi = 1 + \frac{P_a'}{P_0}.$$

Если принять во внимание (6), (7), (8), (12) и (22) и представить момент инерции якоря двигателя в виде

$$\Theta_o = \frac{1}{2} \frac{GD_a^2}{4g} = \frac{1}{2} \gamma \frac{\pi D_a^2 l_0 D_a^2}{4 \cdot 4g} = \gamma D_a^4 l_0 \cdot 10^{-4} \text{ Гсм сек}^2, \quad (30)$$

то машинная постоянная двигателя будет

$$C = \frac{D_a^2 l_0 n}{P_a} = \frac{n \cdot 10^2}{P_a} \sqrt{\frac{\Theta_o l_0}{\gamma}}. \quad (31)$$

Так как обычно отношение $\lambda = \frac{l_o}{D_a} = 0,4—1,6$, то диаметр и длина якоря по уравнению (31) получаются:

$$\left. \begin{aligned} D_a &= \frac{\gamma C^2 P_a^2 \cdot 10^{-4}}{\lambda \Theta_n n_n^2} \text{ [см]}; \\ l_o &= \lambda D_a \text{ [см]}, \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

где n_n — максимальная скорость вращения нагрузки по (6) или (22);
 $\gamma \approx 8,0—8,2 \text{ Г/см}^3$ — средний удельный вес стали и меди якоря малоомощного электродвигателя.

Уравнение (32) можно представить в другом виде для случаев трапецидального и синусоидального графиков реверсивной работы установки, если учесть (6), (22) и (29). Тогда получается:

а) при трапецидальном графике (рис. 2)

$$\left. \begin{aligned} D_a &= \frac{0,18 \gamma \xi_1^2 \Theta_n C^2 \alpha_0^2 f^4 \cdot 10^{-12}}{\lambda \xi_1^2 (1 - \xi_1)^2} \text{ [см]}; \\ l_o &= \lambda D_a \text{ [см]}; \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

б) при синусоидальном графике (рис. 3)

$$\left. \begin{aligned} D_a &= \frac{1,8 \gamma \xi_1^2 \Theta_n C^2 \alpha_0^2 f^4 \cdot 10^{-12}}{\lambda} \text{ [см]}; \\ l_o &= \lambda D_a \text{ [см]}. \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Как показывают уравнения (33) и (34), диаметр якоря реверсивного исполнительного электродвигателя прямо пропорционален моменту инерции нагрузки, квадрату угла размаха колебания нагрузки и машинной постоянной, четвертой степени частоты реверса и при трапецидальном графике обратно пропорционален квадрату относительного времени разгона двигателя. Чем меньше относительное время разгона двигателя ξ_1 , тем больше получается диаметр якоря, так как малое время разгона обуславливает большее значение мощности ускорения, причем коэффициент $\xi = 1 - \frac{P_0'}{P_0}$ в этом случае приближается к единице. Бóльшее время разгона обуславливает обратные соотношения.

Для определения машинной постоянной C по (28) следует выбор значений индукции в воздушном зазоре B_g и линейной нагрузки якоря AS производить с учетом того, что исполнительный электродвигатель реверсивной установки при частотах реверса порядка 0,5—5 гц практически работает в непрерывном неустановившемся режиме с повышенным средним значением тока якоря.

В связи с этим, при значениях расчетной мощности данного двигателя P_a в пределах до 200 вт индукция в воздушном зазоре составляет $B_{\delta} = 3000\text{—}4000$ гс, а линейная нагрузка якоря $AS = 100\text{—}120$ а/см; при значениях мощности P_a в пределах свыше 200 вт и до нескольких сотен ватт эти величины составляют: $B_{\delta} = 4000\text{—}5000$ гс и $AS = 120\text{—}180$ а/см.

Для иллюстрации влияния различных факторов на размеры якоря исполнительного электродвигателя на рис. 7 представлены

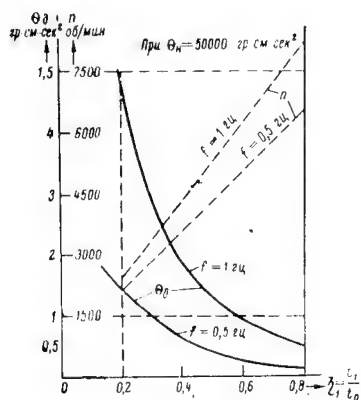


Рис. 7. Зависимость момента инерции и скорости вращения якоря исполнительного электродвигателя от времени разгона его при трансцендентальном графике работы

вается тем, что с увеличением частоты и уменьшением времени разгона системы значительно возрастает расчетная мощность исполнительного двигателя за счет мощности ускорения. Вместе с ней увеличиваются диаметр и длина якоря. Увеличение же размеров якоря приводит к значительному возрастанию момента инерции и по (12) — к уменьшению передаточного числа редуктора, а с ним и скорости вращения двигателя.

кривые момента инерции якоря, согласно (30) и (33), и скорости вращения, согласно (6), (8) и (12), в зависимости от времени разгона двигателя при частотах реверса $f = 0,5$ и 1 гц и моменте инерции нагрузки $J_n = 50000 \text{ Г см сек}^2$. Эти кривые показывают, что с увеличением частоты реверса и уменьшением времени разгона системы происходит заметное увеличение момента инерции или габаритов исполнительного двигателя и значительное уменьшение скорости вращения. Другими словами, при заданном моменте инерции нагрузки с увеличением частоты реверса и уменьшением времени разгона установка становится слишком большой по габаритам. Это обуслови-

4. Пример расчета исполнительного электродвигателя маломощной реверсивной установки постоянного тока

Исходными данными для расчета такого электродвигателя являются следующие величины:

напряжение питающей сети — $U = 27$ в;

мощность статической нагрузки на валу двигателя — $P = 80$ вт;

момент инерции нагрузки — $\Theta_H = 100\,000$ г см сек²;

частота реверса системы — $f = 1$ гц;

угол сектора размаха колебания нагрузки — $\alpha_0 = \frac{\pi}{3}$ радианов;

вид графика изменения скорости колебания нагрузки при реверсе — трапецеидальный (рис. 2);

электрохимическая постоянная времени системы — T_M — не более 0,04 сек.;

время торможения системы (рис. 2) — $t_3 = 0,12$ сек.

Расчет исполнительного электродвигателя по указанным данным может быть произведен в следующем порядке.

1. Определение части расчетной мощности двигателя, соответствующей мощности статической нагрузки на валу

$$P_a' = \frac{1 + 2\eta_i}{3\eta_i} P = \frac{1 + 2 \cdot 0,6}{3 \cdot 0,6} \cdot 80 = 98 \text{ вт},$$

где принято $\eta_i = 0,6$ [1].

2. Наименьшая мощность ускорения системы по (15)

$$P_0 = \frac{0,8}{\xi_1(1-\xi_3)^2} \Theta_H \alpha_0^2 f^3 \cdot 10^{-3} = \frac{0,8}{0,24(1-0,24)^2} \cdot 100000 \left(\frac{\pi}{3}\right)^2 \cdot 1^3 \cdot 10^{-3} = 630 \text{ вт},$$

при этом

$$t_1 \approx 3T_M = 0,12 \text{ сек.}; t_0 = \frac{1}{2f} = 0,5 \text{ сек.}; \xi_1 = \xi_3 =$$

$$\frac{t_1}{t_0} = \frac{0,12}{0,5} = 0,24.$$

3. Полная расчетная мощность двигателя по (29)

$$P_a = P_a' + P_0 = \xi P_0 = 1,15 \cdot 630 = 728 \text{ вт},$$

где

$$\xi = 1 + \frac{P_a'}{P_0} = 1 + \frac{98}{630} = 1,15.$$

4. Диаметр и длина якоря двигателя по (33)

$$D_a = \frac{0,18 \cdot \xi^2 \Theta_H C^2 \alpha_0^2 f^4 \cdot 10^{-12}}{\lambda \xi_1^2 (1 - \xi_3)^2} = \frac{0,18 \cdot 8,0 \cdot 1,15^2 \cdot 100000 \cdot 1100^2 \left(\frac{\pi}{3}\right)^2 \cdot 1^4 \cdot 10^{-12}}{1,4 \cdot 0,24^2 (1 - 0,24)^2} = 5,6 \text{ см};$$

$$l_0 = \lambda D_a = 1,4 \cdot 5,6 = 7,8 \text{ см},$$

где принято $\gamma = 8,0$; $\lambda = 1,4$;

$$C = \frac{6 \cdot 10^8}{\pi B_{\delta} AS} = \frac{6 \cdot 10^8}{0,68 \cdot 4800 \cdot 170} = 1100.$$

5. Момент инерции якоря двигателя по (30)

$$\Theta_d = \gamma D_a^4 l_0 \cdot 10^{-4} = 8,0 \cdot 5,6^4 \cdot 7,8 \cdot 10^{-4} = 6,1 \text{ Гсм сек}^2.$$

6. Наивыгоднейшее значение передаточного числа редуктора по (12)

$$k = \sqrt{\frac{\Theta_n}{\Theta_d}} = \sqrt{\frac{100000}{6,1}} = 128.$$

7. Максимальная скорость вращения вала нагрузки по (6)

$$n_n = \frac{60 \cdot \pi f}{\pi(1 - \xi_{\text{в}})} = \frac{60 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot 1}{\pi(1 - 0,24)} = 26 \text{ об/мин.}$$

8. Установившаяся рабочая скорость вращения исполнительного электродвигателя по (8)

$$n = kn_n = 128 \cdot 26 = 3300 \text{ об/мин.}$$

9. Проверка величины машинной постоянной и уточнение значений индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки якоря двигателя

$$C = \frac{D_a^2 l_0 n}{P_a} = \frac{5,6^2 \cdot 7,8 \cdot 3800}{728} \cong 1100; B_{\delta} AS = \frac{6 \cdot 10^8}{\pi C} =$$

$$= \frac{6 \cdot 10^8}{0,68 \cdot 1100} = 8,0 \cdot 10^5.$$

Окончательно принимается: $a = 0,68$; $B_{\delta} = 4800 \text{ гс}$;

$$AS = \frac{8,0 \cdot 10^5}{4800} = 165 \text{ а.см.}$$

10. После определения основных размеров и скорости вращения исполнительного электродвигателя производится дальнейший расчет других его элементов и параметров известным методом [1], а именно — расчет обмотки якоря, размеров зубцов и пазов его, коллектора и щеток, магнитной системы двигателя, обмотки возбуждения и др. Данные этого расчета в рассматриваемом примере получились следующими:

э.д.с. якоря принята — $E \cong 0,9 U = 0,9 \cdot 27 = 24 \text{ в}$;

расчетный ток якоря — $I_a = \frac{P_a}{E} = \frac{728}{24} = 30 \text{ а}$;

число полюсов — $2p = 2$; число параллельных ветвей обмотки якоря — $2a = 2$;
 магнитный поток полюса — $\Phi = 0,105 \cdot 10^6$ мкс;
 число проводников обмотки якоря — $N = 204$;
 диаметр и сечение проводника — $2 \times d_a/d_{an} = 2 \times 1,04/1,15$ мм;
 $q_a = 2 \times 0,850 = 1,70$ мм²; марка провода ПЭВ-2;
 сопротивление обмотки якоря при 20°C — $r_a = 0,065$ ом;
 площадь паза якоря — $S_n = 56$ мм²;
 число пазов якоря — $z = 17$;
 высота паза — $h_n = 15$ мм; толщина зубца — $z_{мин} = 3,2$ мм;
 диаметр и длина коллектора — $D_k = 49$ мм; $l_k = 35$ мм;
 число коллекторных пластин — $K = 51$;
 размеры щетки — $2 \times a_{щ} \times b_{щ} = 2 \times 10 \times 5$ мм, марка щетки М-6; $\Delta U_{щ} = 1,5$ в;
 длина воздушного зазора — $\delta = 0,50$ мм; $k_1 = 1,15$;
 диаметр вала — $d_{в.л} = 11$ мм;
 размеры полюса — $b_{п.л} \times l_{п.л} = 14 \times 78$ мм; $h_{п.л} = 17$ мм; $S_{п.л} = 10$ см²;
 размеры станины — $l_c = 110$ мм; $h_c = 5$ мм; $S_c = 5,5$ см²;
 число витков обмотки возбуждения на полюс — $W_n = 330$;
 диаметр и сечение проводника — $d_n/d_{ni} = 0,62/0,70$ мм; $q_n = 0,301$ мм²; марка провода ПЭВ-2;
 сопротивление обмотки возбуждения при 20°C — $r_n = 18,4$ ом;
 ток возбуждения — $I_n = 1,2$ а.

Электромеханическая постоянная времени системы будет

$$T_m = \frac{9,81 R_a \left(\Theta_0 + \Theta_n \frac{1}{k^2} \right) \cdot 10^{-5}}{(c \Phi_a)^2} = \frac{9,81 \cdot 0,115 \left(6,1 + 100000 \cdot \frac{1}{128^2} \right) \cdot 10^{-5}}{(0,65 \cdot 10^{-6} \cdot 0,105 \cdot 10^6)^2} = 0,027 \text{ сек.},$$

при этом

$$R_a = r_a + r_{щ} = 0,065 + 0,05 = 0,115 \text{ ом}; r_{щ} = \frac{\Delta U_{щ}}{I_a} = \frac{1,5}{30} = 0,05 \text{ ом};$$

$$c = \frac{N}{2\pi} \frac{p}{a} \cdot 10^{-8} = \frac{204}{2\pi} \cdot \frac{2}{1} \cdot 10^{-8} = 0,65 \cdot 10^{-6}; k = 128;$$

$$\Theta_0 = 6,1 \text{ Гсм сек}^2; \Theta_n = 100000 \text{ Гсм сек}^2; \Phi_a = 0,105 \cdot 10^6 \text{ мкс.}$$

Выводы

Анализ работы и основ расчета маломощной реверсивной установки постоянного тока показал:

1. Основными факторами, определяющими работу маломощной реверсивной установки с относительно большим маховым моментом на валу исполнительного электродвигателя, являются частота

реверса двигателя, вид графика изменения скорости колебания вала нагрузки, электромеханическая постоянная времени системы, величина момента инерции нагрузки и угол сектора размаха колебаний ее относительно оси вала.

2. При разгоне системы в течение заданного промежутка времени исполнительный электродвигатель должен преодолевать значительный момент ускорения, расходуя на это соответствующую мощность. Минимальные значения момента и средней мощности ускорения при разгоне системы получаются при определенном невыгоднейшем передаточном числе редуктора между валами двигателя и нагрузки, равном корню квадратному из отношения моментов инерции нагрузки и якоря двигателя.

3. Самая минимальная средняя мощность ускорения получается при наибольшем времени разгона системы за полупериод частоты реверса. Чем меньше время разгона и выше частота реверса, тем большей получается мощность ускорения при данном моменте инерции нагрузки.

4. Так как исполнительный электродвигатель маломощной реверсивной установки при частотах реверса порядка 1—5 гц практически работает в непрерывном неустановившемся режиме, то для определения основных размеров его нужно в величину расчетной или габаритной мощности включать также и среднюю мощность ускорения. В этом случае диаметр якоря при трапецидальном и синусоидальном графиках работы прямо пропорционален моменту инерции нагрузки, квадрату угла размаха колебания ее и машинной постоянной и четвертой степени частоты реверса, а в случае трапецидального графика — обратно пропорционален также и квадрату времени разгона.

5. При заданном моменте инерции нагрузки, с увеличением частоты реверса и уменьшением времени разгона системы, происходит увеличение момента инерции якоря исполнительного двигателя и заметное уменьшение скорости вращения, вследствие чего установка становится более тихоходной и большей по габаритам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. П. Ермолин. Расчет маломощных коллекторных машин, Госэнергоиздат, 1955.

Поступила 25/V 1956 г.

Канд. техн. наук Н. П. ЖЕРНИН

УСЛОВИЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Синхронный генератор имеет менее благоприятную характеристику цепи возбуждения, чем машина постоянного тока, вследствие наличия в этой цепи нелинейного звена в виде выпрямителя. Падение напряжения в выпрямителе обуславливает высокое сопротивление цепи возбуждения в начале процесса самовозбуждения, уменьшающееся по мере увеличения тока через выпрямитель. Таким образом, условия самовозбуждения синхронного генератора отличаются некоторой спецификой.

Общие условия самовозбуждения синхронного генератора могут быть сформулированы следующим образом.

1. Для самовозбуждения необходимо наличие остаточного намагничивания.
2. Необходимо правильное подключение обмотки возбуждения к выпрямителю (соблюдение полярности).
3. Сопротивление цепи возбуждения, приведенное к статору, должно быть меньше критического сопротивления.
4. Остаточная э.д.с. должна быть больше падения в выпрямителе, приведенного к статору.

Первые три условия аналогичны условиям самовозбуждения машин постоянного тока. Необходимость выполнения четвертого условия иллюстрируется рис. 1, на котором представлены два возможных случая характеристик цепи возбуждения. Очевидно, в случае *а* самовозбуждение возможно, в случае *б* — невозможно: в последнем случае машина возбудится лишь до точки *В*. Однако, если генератору дать (хотя бы кратковременно) постороннее возбуждение, например, от стартерной батареи, то он возбудится и будет устойчиво работать в точке *А*, причем сможет нести определенную нагрузку и будет допускать регулирование напряжения

в известных пределах. Это можно рассматривать, как один из методов самовозбуждения, применение которого может быть уместным, например, при некотором размагничивании генератора. Дополнительный ток независимого возбуждения, необходимый для такой операции, может быть весьма невелик по сравнению с номинальным током возбуждения генератора. При этом имеется в виду, конечно, что первые три условия самовозбуждения соблюдаются. Так, например, если приведенное сопротивление цепи возбуждения больше критического, то характеристика цепи возбуждения пересечет характеристику холостого хода только один раз — в районе точки *B*. В этом случае указанная выше операция будет, естественно, безрезультатной.

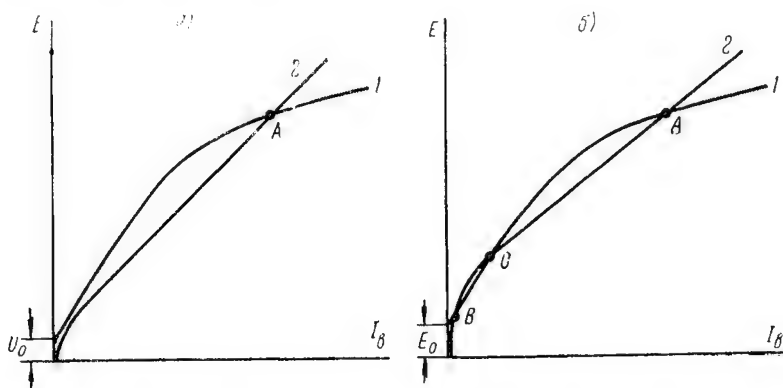


Рис. 1. Возможные соотношения между характеристиками цепи возбуждения и холостого хода:

1 — характеристика холостого хода; 2 — характеристика цепи возбуждения

Из перечисленных четырех условий самовозбуждения два последних зависят от коэффициента трансформации анодного трансформатора цепи возбуждения. Исходя из этих условий, можно определить коэффициент трансформации, необходимый для самовозбуждения машины.

В порядке первого приближения предположим, что падение напряжения в выпрямителе представляет собой постоянную величину, не зависящую от величины выпрямляемого тока. Тогда уравнение характеристики цепи возбуждения будет иметь вид

$$AE = k(Z_a I_a + \Delta U_a), \quad (1)$$

где E — э.д.с. генератора (действующее значение);

I_a — ток возбуждения;

$$Z_a = R_a + R_1 + \frac{mx_1}{2\pi};$$

R_a — омическое сопротивление цепи выпрямленного тока;
 R_1 — общее активное сопротивление цепи анодного тока, приведенное к вторичной обмотке анодного трансформатора;
 m — число фаз схемы выпрямления;
 x_1 — общее индуктивное сопротивление цепи анодного тока, приведенное к вторичной обмотке анодного трансформатора;
 k — коэффициент трансформации анодного трансформатора;
 $A = \sqrt{2} \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}$ — постоянная схемы выпрямления (отношение среднего значения выпрямленного напряжения к действующему значению переменного напряжения);
 ΔU_a — падение напряжения в выпрямителе.
 Уравнение (1) дает прямую с угловым коэффициентом

$$b = \frac{kZ_a}{A}, \quad (2)$$

которая пересекает оси координат в точках

$$I_{ao} = -\frac{\Delta U_a}{Z_a}; \quad U_o = \frac{\Delta U_a k}{A}.$$

Таким образом, третье условие самовозбуждения может быть сформулировано как

$$a > b, \quad (3)$$

где a — тангенс угла наклона прямолинейной части характеристики холостого хода.

Четвертое условие самовозбуждения может быть сформулировано как

$$E_o > U_o, \quad (4)$$

где E_o — э.д.с. остаточного намагничивания.

Из условий (3) и (4) следует, что коэффициент трансформации анодного трансформатора для успешного самовозбуждения должен удовлетворять следующим неравенствам:

$$k < \frac{Aa}{Z_a}; \quad (5)$$

$$k < \frac{AE_o}{\Delta U_a}. \quad (6)$$

Известно, что падение напряжения в полупроводниковых выпрямителях не представляет собой постоянной величины, а

является функцией выпрямляемого тока. Рассмотрим условия самовозбуждения с учетом этого обстоятельства.

Из сопоставления кривых рис. 1 видно, что граничным случаем возможности и невозможности самовозбуждения является касание приведенной к статору генератора характеристики цепи возбуждения и прямолинейной части характеристики холостого хода. Предположим, что надение в выпрямителе может быть представлено в виде некоторой аналитической функции тока возбуждения

$$\Delta U_n = f(I_n).$$

Тогда уравнение цепи возбуждения

$$AE = k[Z_n I_n + f(I_n)]. \quad (7)$$

Уравнение начальной части характеристики холостого хода

$$E = \alpha I_n + E_0. \quad (8)$$

При этом предполагается, что единственным нелинейным звеном в цепи возбуждения является выпрямитель, так как рассматривается начало процесса самовозбуждения, когда насыщение анодного трансформатора отсутствует.

Предположим, что при заданной характеристике холостого хода касание характеристик возможно в точке с координатами I_n^* , E^* .

Составим уравнение касательной к характеристике цепи возбуждения в этой точке

$$A \frac{dE}{dI_n} = k[Z_n + f'(I_n)];$$

$$E = \frac{k}{A} [Z_n + f'(I_n^*)] I_n = \frac{k}{A} [Z_n + f'(I_n^*)] I_n^* + E^*. \quad (9)$$

Так как касательной в данном случае является начальная часть характеристики холостого хода, то, сопоставляя уравнения (8) и (9), получаем систему:

$$\left. \begin{aligned} E_n &= E^* - \frac{k}{A} [Z_n + f'(I_n^*)] I_n^*; \\ \alpha &= \frac{k}{A} [Z_n + f'(I_n^*)]; \\ E^* &= \frac{k}{A} [Z_n I_n^* + f(I_n^*)]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Отсюда необходимый для самовозбуждения коэффициент трансформации должен удовлетворять условию

$$k < \frac{Aa}{Z_a + f'(I_a)}, \quad (11)$$

которое для рассматриваемого случая объединяет в себе условия (5) и (6). Значение производной определяется из выражения

$$f'(I_a^*) = \frac{af(I_a^*) - E_0 Z_a}{E_0 + aI_a^*}, \quad (12)$$

которое при подстановке в (11) дает

$$k < \frac{A(E_0 + aI_a^*)}{f(I_a^*) + Z_a I_a^*}. \quad (13)$$

Последним выражением пользоваться более удобно, так как определение функции в данном случае сопровождается меньшей ошибкой, чем определение производной.

Пример 1. Вольтамперная характеристика выпрямителя может быть аппроксимирована степенной функцией

$$\Delta U_a = f(I_a) = \alpha I_a^\beta, \quad (14)$$

где $\beta = 0,2 - 0,4$, а коэффициент α зависит от типа, класса и мощности выпрямителя и может изменяться в широких пределах. Аппроксимирование производится по значению функции и ее производной в одной точке, которая должна быть расположена вблизи предполагаемой точки возможного касания характеристик. Коэффициенты определяются из выражений:

$$\beta = \frac{\Delta U'_a}{\Delta U_a} I_a; \quad \alpha = \frac{\Delta U_a}{I_a^\beta}. \quad (15)$$

Производная определяется как тангенс угла наклона касательной к кривой ΔU_a в данной точке, причем

$$f'(I_a) = \alpha \beta I_a^{\beta-1}. \quad (16)$$

В результате получаем следующее выражение для нахождения I_a^*

$$\alpha \beta I_a^{*\beta-1} (1-\beta) = E_0 Z_a I_a^{*\beta-1} + E_0 \alpha \beta, \quad (17)$$

которое может быть решено только путем подбора. После нахождения I_a^* производная определяется путем подстановки координаты I_a^* в уравнение (16).

Пример 2. Аппроксимирование вольтамперной характеристики может быть произведено также при помощи функции

$$\Delta U_n = f(I_n) = \frac{\alpha I_n}{\beta + I_n}. \quad (18)$$

Коэффициенты α и β определяются здесь по двум точкам, расположенным по обе стороны от предполагаемой точки возможного касания характеристик $(I_{n1}, \Delta U_1)$ и $(I_{n2}, \Delta U_2)$:

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{\Delta U_1 - \Delta U_2}{\frac{\Delta U_2}{I_{n2}} - \frac{\Delta U_1}{I_{n1}}}; \\ \alpha &= \frac{\Delta U_1}{I_{n1}} (\beta + I_{n1}) = \Delta U_1 \left(\frac{\beta}{I_{n1}} + 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Производная от аппроксимирующей функции

$$f'(I_n) = -\frac{\alpha\beta}{(\beta + I_n)^2}. \quad (20)$$

Подставляя выражения (18) и (20) в уравнение (12), составленное для точки (I_n^*, E^*) , получаем

$$I_n^* = -\frac{\beta E_o}{\alpha Z_o + E_o Z_n} \left[Z_n + \alpha \sqrt{\frac{\alpha Z - E_o Z_n + \alpha^2 Z_n}{\alpha^2 Z_n}} \right]. \quad (21)$$

Таким образом, в данном случае задача может быть решена непосредственно. Однако функция (18) даст более грубое приближение, поэтому область точки возможного касания должна быть определена более точно, в противном случае значение производной (20) будет сильно искажено. Здесь можно использовать метод последовательных приближений: после ориентировочного определения координаты I_n^* производится уточнение коэффициентов α и β .

Необходимо отметить, что коэффициент трансформации всегда следует выбирать с некоторым запасом, учитывая возможное размагничивание генератора, старение выпрямителей и т. д.

Как известно, при коэффициенте трансформации анодного трансформатора

$$k = \frac{AU_n}{U_{нн}}$$

для надежного самовозбуждения необходимо иметь остаточную э.д.с. в размере 7—8% от номинального напряжения генератора. Как правило, для большинства машин обычного исполнения оста-

точная э.д.с. составляет 1—2% от U_n и менее. Искусственное увеличение остаточной э.д.с. (применение магнитных прокладок и другие методы) сопровождается усложнением конструкции генератора и делает метод самовозбуждения недостаточно универсальным. Поэтому представляется наиболее целесообразным использование анодных трансформаторов с коэффициентами трансформации

$$k < \frac{AU_n}{U_{ан}}$$

определяемыми в соответствии с условиями самовозбуждения, как это было показано выше. В этом случае, очевидно, при номинальном напряжении на зажимах генератора, напряжение на зажимах обмотки возбуждения будет выше номинального. В связи с этим возникает необходимость применения специальных токоограничивающих схем, изменяющих свои параметры в функции частоты или напряжения генератора. Сюда относятся схемы с переключателями, позволяющие изменять коэффициент трансформации анодного трансформатора, схемы с насыщающимися трансформаторами, резонансные схемы и др.

Исследование этих схем представляет собой тему специальной работы.

Поступила 5/II 1957 г.

Канд. техн. наук Б. Э. ИСТЕРОВ

РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МАШИН ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Важнейшим параметром машин повышенной частоты индукторного типа являются индуктивные сопротивления их обмоток.

Из соображений удобства выполнения рабочей обмотки ее катушки размещают не на всех зубцах статора, а лишь на половине. При этом может быть два варианта размещения катушек.

1. Катушки статора охватывают те зубцы разной полярности, против которых одновременно могут быть установлены зубцы ротора или пазы ротора.

2. Катушки статора размещены на тех зубцах разной полярности, против которых не устанавливаются одновременно зубцы или пазы ротора. В этом случае, если против обмотанных зубцов, например, северной полярности, установлены зубцы ротора, то против обмотанных зубцов южной полярности расположатся пазы ротора.

Машины с упомянутыми вариантами размещения катушек рабочей обмотки статора удобно кратко называть соответственно машинами первого варианта и машинами второго варианта.

Исследование индуктивных сопротивлений следует производить в связи с анализом рабочего процесса машины. Наиболее подходящей формой для этой цели является анализ потокоцеплений обмотки статора.

В случае ненасыщенной магнитной цепи машины можно считать результирующий поток при нагрузке равным сумме потоков, созданных током возбуждения и током статора.

В результате расчета магнитной цепи индукторной машины методом контурных токов (потоков) могут быть определены магнит-

ные потоки во всех участках магнитной цепи и составлены следующие уравнения суммы потокоцеплений обмотки статора:

а) для машин первого варианта

$$\Sigma \Psi_a = \Psi_p \sin(\omega t - \psi) + \Psi_{m1} \sin(\omega t - \psi) + \Psi_{m2} \sin(2\omega t - \psi) + \Psi_{ar} \sin(\omega t - \psi) - \Psi_3 \sin(3\omega t - \psi) + \Psi_{p3} \sin(\omega t + \psi) + \Psi_{om} + \Psi_m \cos \omega t; \quad (1)$$

б) для машин второго варианта

$$\Sigma \Psi_a = \Psi_p \sin(\omega t - \psi) + \Psi_{p3} \sin(\omega t + \psi) - \Psi_3 \sin(3\omega t - \psi) + \Psi_m \cos \omega t. \quad (2)$$

В этих уравнениях, кроме потокоцеплений Ψ_{om} и $\Psi_m \cos \omega t$, созданных током возбуждения, все остальные потокоцепления созданы током статора.

Производная из уравнений (1) и (2) по времени дает сумму электродвижущих сил, индуктирующихся в обмотке статора машины при нагрузке:

а) в машине первого варианта

$$\begin{aligned} \Sigma e_a = - \frac{d}{dt} [\Sigma \Psi_a] = E_p \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}\right) + \\ + E_{m1} \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}\right) + E_{2m} \sqrt{2} \sin\left(2\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}\right) - \\ - E_3 \sqrt{2} \sin\left(3\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}\right) + E_{p3} \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}\right) + \\ + E_m \sqrt{2} \sin \omega t; \end{aligned} \quad (3)$$

б) в машине второго варианта

$$\begin{aligned} \Sigma e_a = - \frac{d}{dt} [\Sigma \Psi_a] = E_p \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}\right) - \\ - E_3 \sqrt{2} \sin\left(3\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}\right) + E_{p3} \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}\right) + \\ + E_m \sqrt{2} \sin \omega t. \end{aligned} \quad (4)$$

Составляющие суммарной э.д.с. двойной и тройной частоты в результате применения специальных мер могут быть значительно уменьшены и в дальнейшем опускаются из рассмотрения.

Составляющая э.д.с. $E_m \sqrt{2} \sin \omega t$, обусловленная потоком возбуждения, при работе машины на нагрузку должна быть такой величины, чтобы в результате геометрического сложения с други-

ми составляющими основной частоты получалось на зажимах обмотки статора еще и необходимое напряжение U .

Учитывая падение напряжения в активном сопротивлении обмотки статора и напряжения на ее зажимах, уравнения (3) и (4) приобретают следующий вид:

а) машина первого варианта

$$u = E_p \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}\right) + E_{m1} \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}\right) + \\ + E_{p3} \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}\right) + E_m \sqrt{2} \sin \omega t - I \sqrt{2} r_u \sin(\omega t - \psi); \quad (5)$$

б) машина второго варианта

$$u = E_p \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \psi - \frac{\pi}{2}\right) + E_{p3} \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}\right) + \\ + E_m \sqrt{2} \sin \omega t + I \sqrt{2} r_a \sin(\omega t - \psi). \quad (6)$$

На рис. 1 представлена векторная диаграмма э.д.с. и падений напряжения, построенная на основании уравнения (5) для индукторной машины первого варианта.

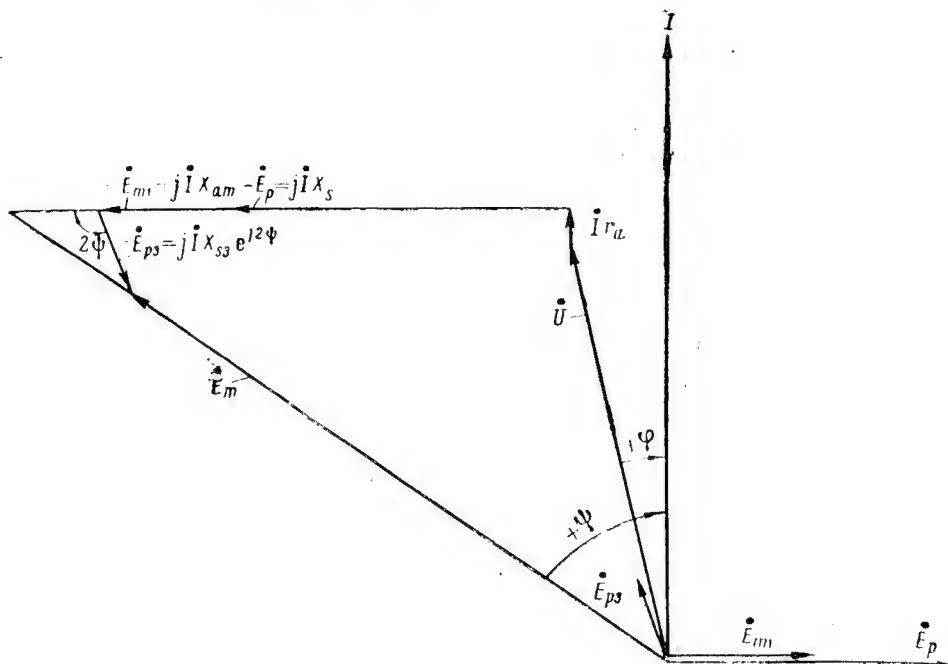


Рис. 1. Векторная диаграмма э.д.с. и падений напряжения

Из векторной диаграммы следует, что

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{U \sin \varphi + I(x_s + x_{am} + x_{sz})}{U \cos \varphi + Ir_a}. \quad (7)$$

Составляющие э.д.с. \dot{E}_m , уравнивающие э.д.с. \dot{E}_p ; \dot{E}_{m1} и \dot{E}_{pz} , пропорциональные току статора, равны падениям напряжения в индуктивных сопротивлениях обмотки.

Таким образом, падение напряжения в общей индуктивности машины первого варианта

$$-(\dot{E}_p + \dot{E}_{m1} + \dot{E}_{pz}) = jI(x_s + x_{am} + x_{sz}e^{j2\psi}). \quad (8)$$

Отсюда следует, что общая индуктивность индукторной машины первого варианта

$$x = x_s + x_{am} + x_{sz}e^{j2\psi}, \quad (9)$$

где

$$x_s = \frac{E_p}{I}; \quad x_{am} = \frac{E_{m1}}{I} \quad \text{и} \quad x_{sz} = \frac{E_{pz}}{I}. \quad (10)$$

Векторная диаграмма для машин второго варианта, как это следует из уравнения (6), не содержит составляющей jIX_{am} , уравнивающей э.д.с. \dot{E}_{m1} .

В результате расчета магнитной цепи индукторной машины получается, что:

$$\Psi_p = s_a \left(\frac{w_a}{a} \right)^2 l_a I \left\{ 0,445 \left[\frac{2\lambda_0^2 - \lambda_1^2}{(k_{gc} + 1)\lambda_0} \right] + \right. \\ \left. + 3,55 \left(\lambda_n + \lambda_s \frac{l_s}{l_a} \right) \right\} \cdot 10^{-8} [\text{вб}]; \quad (11)$$

$$\Psi_{m1} = 1,78 \frac{k_{gc}}{(k_{gc} + 1)} \lambda_0 l_a \left(\frac{w_a}{a} \right)^2 s_a I \cdot 10^{-8} [\text{вб}]; \quad (12)$$

$$\Psi_{pz} = 0,222 \frac{\lambda_1^2}{(k_{gc} + 1)\lambda_0} l_a \left(\frac{w_a}{a} \right)^2 s_a I \cdot 10^{-8} [\text{вб}], \quad (13)$$

где s_a — число катушек обмотки статора;
 w_a — число витков в одной катушке статора;
 a — число параллельных ветвей обмотки статора;
 l_a — активная длина машины, см;
 I — действующее значение тока нагрузки (ток во внешней цепи), а;
 λ_0 и λ_1 — постоянная и переменная основной частоты, составляющие удельной проводимости воздушного зазора в пределах зубцового деления статора;

λ_n и λ_a — удельные проводимости пазового и лобового рассеяния;

l_a — длина одного лобового соединения, см;

$$c = \frac{AW_{\delta}}{AW_c} = \frac{1,6 \delta B_{\delta}}{AW_c}$$

— коэффициент, характеризующий отношение м.д.с., затрачиваемой в зазоре, к м.д.с., затрачиваемой на всех ферромагнитных участках магнитной цепи;

δ — длина зазора между зубцом статора и зубцом ротора, см;

B_{δ} — индукция в зазоре, гс;

$k_g = 0-0,5$ — коэффициент демпфирования колебаний основной частоты результирующего потока, сцепленного с обмоткой возбуждения.

Коэффициент k_g практически равен нулю для машин второго варианта любой конструкции, а также и для машин первого варианта, имеющих массивные участки магнитной цепи (вал, корпус). В машинах первого варианта с шихтованным магнитопроводом на всех участках величина коэффициента демпфирования отлична от нуля и в среднем может быть принята равной 0,3.

Имея в виду, что э.д.с. \dot{E}_p , \dot{E}_{m1} и \dot{E}_{p2} могут быть получены путем дифференцирования соответствующих им потокосцеплений, изменяющихся во времени синусоидально с круговой частотой $\omega = 2\pi f$, и учитывая выражения (10), (11), (12) и (13), можно получить следующие уравнения для расчета индуктивных сопротивлений индукторных машин:

$$x_s = x_n + x_a + x_{o3} \quad [OM]; \quad (14)$$

$$x_n = 15,8 f s_a \left(\frac{w_a}{a} \right)^2 l_a \lambda_n \cdot 10^{-8} \quad [OM]; \quad (15)$$

$$x_a = 15,8 f s_a \left(\frac{w_a}{a} \right)^2 l_a \lambda_a \cdot 10^{-8} \quad [OM]; \quad \lambda_a \approx 0,4; \quad (16)$$

$$x_{o3} = 1,98 f s_a \left(\frac{w_a}{a} \right)^2 l_a \left[\frac{2\lambda_0^2 - \lambda_1^2}{(k_g c + 1)\lambda_0} \right] \cdot 10^{-8} \quad [OM]; \quad (17)$$

$$x_{s3} = f \frac{\lambda_1^2}{(k_g c + 1)\lambda_0} l_a \left(\frac{w_a}{a} \right)^2 s_a \cdot 10^{-8} \quad [OM]; \quad (18)$$

$$x_{am} = 7,9 f \frac{k_g c}{(k_g c + 1)} \lambda_0 l_a \left(\frac{w_a}{a} \right)^2 s_a \cdot 10^{-8} \quad [OM]. \quad (19)$$

Из (9) непосредственно следует один из возможных методов экспериментального определения индуктивных сопротивлений ма-

шины. Так как при коротком замыкании угол $\psi = \frac{\pi}{2}$, то индуктивность машины

$$x_k = x_s + x_{am} - x_{sz}. \quad (20)$$

В резонансном режиме, когда внутренняя индуктивность машины компенсируется емкостным сопротивлением конденсатора, приключенного к зажимам обмотки статора, угол ψ равен 0 и индуктивность машины

$$x_p = x_s + x_{am} + x_{sz}, \quad (21)$$

причем

$$x_p = \frac{U_c}{I_c}, \quad (22)$$

где U_c — падение напряжения на емкости;
 I_c — ток, протекающий через емкость.

Из (20) и (21) следует:

$$(x_s + x_{am}) = \frac{x_p + x_k}{2}; \quad (23)$$

$$x_{sz} = \frac{x_p - x_k}{2}. \quad (24)$$

Величина индуктивности короткого замыкания машины может быть определена из характеристик холостого хода и короткого замыкания по уравнению

$$x_k \approx \frac{E_k}{I_k}, \quad (25)$$

где E_k — определено из характеристики холостого хода для м.д.с. ($AW_k - AW_{ar}$);

I_k — ток к.з., соответствующий м.д.с. AW_k .

Следует иметь в виду, что действие м.д.с. реакции статора

$$AW_{ar} = I \sqrt{2} \frac{w_a}{a} \sin(-\psi)$$

на э.д.с. машин, имеющих массивные участки магнитной цепи, можно не учитывать ввиду значительного расхождения восходящей и нисходящей ветвей характеристики холостого хода.

Второй метод, вытекающий из анализа (1), сводится к измерению методом вольтметра-амперметра индуктивных сопротивлений обмотки статора индукторной машины при трех положениях ротора:

x_0 — индуктивное сопротивление при совпадении обмотанных зубцов статора с зубцами ротора;

$x_{\frac{\pi}{2}}$ — индуктивное сопротивление при совпадении осей пазов ротора с осями зубцов ротора;

x_{π} — индуктивное сопротивление при совпадении обмотанных зубцов статора с пазами ротора.

Получив индуктивности обмотки статора при трех положениях неподвижного ротора, можно вычислить индуктивности x_s и x_{sz} по следующим уравнениям:

$$(x_s + x_{sz}) = \frac{1}{2} \left[\left(x_0 + x_{\frac{\pi}{2}} \right) + \frac{1}{2} \left(x_0 - x_{\pi} \right) \right]; \quad (26)$$

$$x_{sz} = \frac{1}{4} \left[\left(x_{\frac{\pi}{2}} - x_0 \right) + \frac{1}{2} \left(x_0 - x_{\pi} \right) \right]. \quad (27)$$

Сравнение значений индуктивных сопротивлений, рассчитанных по (14) — (19), с опытными данными показывает достаточное совпадение.

Поступила 29/IV 1957 г.

Канд. техн. наук, доц. В. Н. ШЕВЦОВ

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СОЧЕТАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ОТОПИТЕЛЬНЫМИ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЯМИ

Основным видом топлива в настоящее время в СССР служит уголь. По Европейской части СССР, при сосредоточении здесь около $\frac{3}{4}$ всего промышленного производства страны добывается лишь около половины всей добычи угля. Дефицит пополняется завозом из Сибири и Казахстана на расстояние до 2,5—3,5 тыс. км ежегодно около 14 млн. т угля.

Для изжития такого ненормального положения предположено всемерно форсировать добычу топлива в Европейской части Союза, в частности широко использовать запасы природного газа и нефти. Однако, и этого совершенно недостаточно для удовлетворения всей потребности в топливе Европейской части СССР. Поэтому кроме этого намечены следующие мероприятия.

1. Полное использование всех без исключения гидроэнергетических ресурсов этой части СССР в самое ближайшее время.

2. Жесткое ограничение здесь строительства тепломеханических и электромеханических производств с перенесением их в Сибирь.

3. Всемерная экономия топлива за счет теплофикации, которая будет в Европейской части СССР развиваться преимущественно на базе отопления.

Таким образом, для этой части СССР особый интерес приобретают отопительные ТЭЦ. В периодической печати были опубликованы результаты эксплуатации электрических станций за 1953 г. [1]. Лучших результатов по расходу топлива из всех тепловых станций Союза добилась Ленинградская станция № 3, преимущественно отопительная, удельный расход условного топлива на 1 квт-ч электроэнергии у которой составил 168 г; другие, хотя и более мощные и имеющие более дорогое современное оборудова-

ние высокого давления теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), имели значительно превышающие указанную величину расходы топлива. Так, например: Московская № 7 — 207 г, Киевская № 3 — 427 г, лучшие тепловые станции конденсационного типа КЭС — 480 г [1].

Такое соотношение удельных расходов топлива объясняется, главным образом, тем обстоятельством, что Ленинградская ТЭЦ № 3, перестроенная еще в двадцатых годах инж. Л. Л. Гинтером по инициативе, проекту и под руководством пионера теплофикации — профессора Ленинградского Электротехнического института имени В. И. Ульянова (Ленина) В. В. Дмитриева, для целей отопления, оборудована турбинами с противодавлением и работает по строго теплофикационному режиму.

ТЭЦ с противодавлением имеют один существенный недостаток — вынужденное непостоянство выработки электроэнергии на протяжении года и полное прекращение выработки в летний не-отопительный сезон. Поэтому, для избежания ограничения выработки электроэнергии, на современных ТЭЦ устанавливаются, как правило, турбины с отъемом пара и конденсацией, гарантирующие постоянство выработки электроэнергии в любой период года. Однако, удельные расходы топлива, себестоимость и единовременные капитальные вложения на этих ТЭЦ ввиду их относительной сложности значительно больше, чем на ТЭЦ с противодавлением.

Более широкое использование ТЭЦ с противодавлением при совместной эксплуатации в системе гидроэлектростанций (ГЭС) может иметь большое народнохозяйственное значение, содействуя более быстрому развитию работ по теплофикации. Мы хотели особо обратить внимание на то, что неравномерный на протяжении года режим выработки электроэнергии ГЭС, строящихся в настоящее время нарастающими темпами, очень хорошо взаимно компенсируется с неравномерным режимом отопительных ТЭЦ с противодавлением.

Режим водотока рек и соответственная выработка электроэнергии на ГЭС, упрощенно, по месяцам года представлены на рис. 1. Резко выделяющийся весенний паводок может быть зарегулирован специально построенными водохранилищами, как это и видно на рис. 1. Однако, по условиям развития сельского хозяйства, промышленности и городов в бассейне реки, размеры затоплений ограничивают возможную емкость водохранилищ. Поэтому полный сток весеннего паводка часто не умещается в располагаемом объеме водохранилища и часть воды сбрасывается через водосливную часть плотины.

Заполненный весенним паводком полезный объем водохранилищ может расходоваться на протяжении всего года дополнительно к естественной приточности реки: либо для компенсации расходов воды всех маловодных месяцев на выравнивание, либо —

только месяцев навигационного транспортного периода. Естественно, что во втором случае величина выравненных расходов воды за транспортный период года будет больше, поскольку период выравнивания тем же объемом запасенной воды меньше, чем в первом случае.

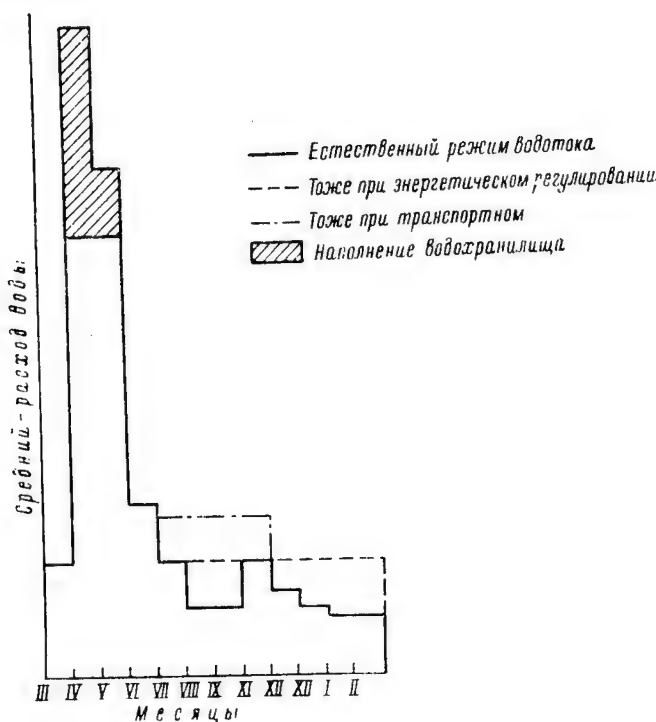


Рис. 1. Режим водотока ГЭС

Первый режим сработки водохранилищ мы называем «энергетическим». Он употребляется в настоящее время почти на всех ГЭС и преследует поддержание постоянной выработки электроэнергии во все месяцы года и, в особенности, в период осенне-зимнего максимума электрической нагрузки в энергосистемах.

Второй режим сработки водохранилищ можно назвать «транспортным», поскольку он обеспечивает возможность получения наибольших глубин на нешлюзованной части реки путем максимального увеличения расходов воды из водохранилища в навигационный период года, что, естественно, дает лучшее использование флота со стороны его загрузки. Этот же транспортный режим

совпадает с интересами других водопользователей: сельского хозяйства, сплава леса, ирригации и пр.

В настоящее время при почти полном отсутствии в наших энергосистемах ТЭЦ, работающих строго по отопительному тепловому режиму, от ГЭС требуется «энергетический» режим сработки водохранилищ. Таким образом, интересы энергетики находятся в противоречии с интересами других водопользователей, так как для энергетики при существующем положении важно сохранить запасы водохранилищ ГЭС на зиму, а для других водопользователей — максимально израсходовать эти запасы летом.

Отмеченное резкое противоречие совершенно исчезает при сочетании режима эксплуатации ГЭС с ТЭЦ, работающими строго по тепловому отопительному режиму и оборудованных простейшими турбинами с противодавлением. В этом случае, оказывается, и для энергосистемы является благоприятным «транспортный» режим сработки водохранилищ ГЭС. Отопительные ТЭЦ с противодавлением компенсируют зимнюю недовыработку электроэнергии на ГЭС и «транспортный» режим регулирования можно назвать тогда «транспортно-энергетическим», одинаково выгодным для всех водопользователей.

Высказанное положение, конечно, нельзя считать полным отрицанием ТЭЦ с конденсационной частью, а также мощных КЭС. Возможность использования в энергосистеме исключительно только ГЭС и ТЭЦ с противодавлением имеется лишь в относительно редких случаях — наличии на ГЭС данной энергосистемы многолетнего регулирования водотока, т. е. весьма емких водохранилищ. Во всех же прочих случаях рекомендуемые ТЭЦ с противодавлением в комбинации с ГЭС, хотя и могут получить широкое распространение, однако размер их суммарной мощности должен ограничиваться по балансам энергии данной энергосистемы в зависимости от режима потребления электроэнергии и режима ГЭС рассматриваемой системы.

В ограниченных пределах статьи нет возможности полностью изложить разработанную методику и способы составления электроэнергетических балансов и даваемые в разных случаях рекомендации. Поэтому мы вынуждены ограничиться лишь общим указанием на то, что при проектировании режима совместной эксплуатации ГЭС и ТЭЦ в энергосистеме и выборе мощности отдельных станций, следует составлять балансы электроэнергии так, чтобы они удовлетворяли уравнениям

$$\sum_{n=1}^{n=12} W_{Эn} + \sum_{n=1}^{n=12} W_{In} = \sum_{n=1}^{n=12} W_{Tn} + \sum_{n=1}^{n=12} W_{Kn};$$

$$W_{Эn} + W_{In} = W_{Tn} + W_{Kn},$$

где $W_{Эn}$ — потребность в электроэнергии энергосистемы за данный месяц (или иной принятый в расчетах отрезок года);
 $W_{Гn}$ — выработка электроэнергии на ГЭС за данный месяц года;
 $W_{Тn}$ — то же, на ТЭЦ по тепловому режиму;
 $W_{Кn}$ — то же, на КЭС и на конденсационных частях ТЭЦ;
 $\sum_{n=1}^{n=12} W_{Эn}$ — годовая потребность энергосистемы в электроэнергии;
 $\sum_{n=1}^{n=12} W_{Гn}$ — годовая выработка электроэнергии ГЭС;
 $\sum_{n=1}^{n=12} W_{Тn}$ — годовая выработка электроэнергии ТЭЦ по тепловому режиму;
 $\sum_{n=1}^{n=12} W_{Кn}$ — годовая выработка электроэнергии КЭС и конденсационных частей ТЭЦ.

Опыт показал, что на начальной стадии проектирования достаточно ограничиться составлением балансов по месяцам года. Лишь в порядке дальнейшего уточнения балансов отдельных месяцев (например — паводка) требуется делать расчеты по декадам и суткам.

При составлении электроэнергетических балансов по энергосистеме указанным способом представляется возможным повысить участие отопительных ТЭЦ с противодействием, применяя на ГЭС «транспортное» годичное регулирование водотока. Для компенсации же временных снижений электрической мощности этих ТЭЦ в отопительный период при повышенных температурах наружного воздуха может быть использовано внутрисезонное регулирование на ГЭС. Кроме того, обычно при повышении температуры наружного воздуха зимой естественные расходы воды в реках тоже повышаются. Следовательно, в эти периоды ГЭС будут компенсировать снижение мощности отопительных ТЭЦ, вероятно, даже без регулирования.

Эти общие основные указания можно иллюстрировать ниже следующими примерами. В них для упрощения взяты графики электрической нагрузки энергосистемы на протяжении всего года без учета присоединения новых потребителей и ввода новых мощностей на электрических станциях за этот период.

На рис. 2 дан годовой баланс электроэнергии при наличии в энергосистеме только ГЭС и КЭС. При этом принято энергетическое регулирование водотока ГЭС (см. рис. 1).

На рис. 3 в ту же энергосистему введены еще отопительные ТЭЦ с противодавлением. Как видно, это несколько сократило необходимую мощность КЭС, одновременно уменьшив и выравнив потребляемую от КЭС электроэнергию на протяжении года. При этом на ГЭС и для энергетики выгодно проводить транспортное регулирование водотока.

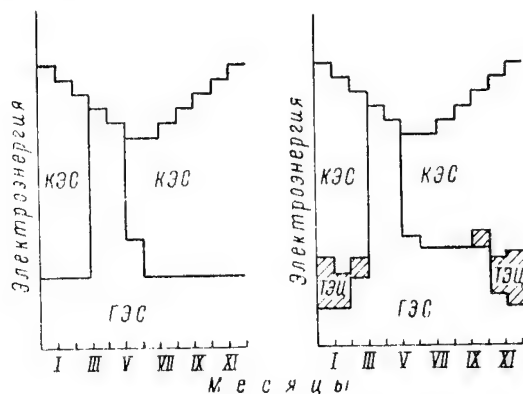


Рис. 2. Баланс энергии системы при наличии КЭС и ГЭС с энергетическим регулированием водотока

Рис. 3. Баланс энергии системы при наличии КЭС, ТЭЦ (отопительных) и ГЭС с транспортным регулированием водотока

Для определения потребной установленной мощности электростанций (ГЭС, ТЭЦ и КЭС) необходимо составить, кроме балансов энергии, еще балансы мощности по данной энергосистеме. При этом для каждого периода года, например (как принято выше) для каждого месяца года, соблюдается нижеследующее уравнение, с учетом формы и полноты соответствующих суточных графиков электрической нагрузки данной энергосистемы

$$P_{Эн} + \Delta P_n^{рез} + \Delta P_n^{ав} + \Delta P_n^{рем} + \Delta P_n^{своб} = P_T + P_G + P_K,$$

где $P_{Эн}$ — часовой максимум электрической нагрузки энергосистемы за данный месяц года;
 $\Delta P_n^{рез}$ — необходимый нагрузочный резерв;
 $\Delta P_n^{ав}$ — то же, аварийный;
 $\Delta P_n^{рем}$ — мощность электростанций, находящаяся в данный месяц в ремонте;

$\Delta P_n^{своб}$ — свободная (излишняя) мощность в данный месяц;
 P_T — установленная мощность ТЭЦ;
 P_G — то же, ГЭС;
 P_K — то же, КЭС.

Часовой максимум электрической нагрузки для каждого месяца покрывается на основе суточных графиков

$$P_{Эн} = P_{ЭТн} + P_{ЭГн} + P_{ЭКн},$$

где $P_{ЭТн}$ — участие теплоэлектроцентралей в часовом максимуме электрической нагрузки данного месяца;

$P_{ЭГн}$ — то же, гидростанций;

$P_{ЭКн}$ — то же, тепловых станций конденсационного типа и конденсационной части ТЭЦ.

Вопрос о необходимости совместного использования гидроэлектрических станций с тепловыми был поставлен еще при проектировании Волховской ГЭС в двадцатых годах. Затем в тридцатых годах при проектировании Верхне-Волжских ГЭС составлялись электроэнергетические балансы по энергосистеме с подразделением режима тепловых станций уже на теплофикационный и конденсационный. Однако, как тогда, так и до настоящего времени мощность ТЭЦ, их тип и основные параметры принимались заранее заданными, а не выбирались, как мы рекомендуем, из условий совместной эксплуатации с ГЭС данной энергосистемы по балансам энергии и мощности.

Действительно, выбор мощности ТЭЦ, а также связанной с этим экономически целесообразной зоны охвата прилегающей территории централизованным теплоснабжением устанавливается без учета особенностей режима водотока ГЭС той же энергосистемы. Организациями, проектирующими тепловые станции, выбор мощности ТЭЦ производится по графику тепловых нагрузок, построенному по продолжительности (рис. 4).

В этом графике отдельные периоды года обезличены и поэтому никак не могут быть совмещены с годовым режимом водотока ГЭС, что необходимо для комплексного решения вопроса.

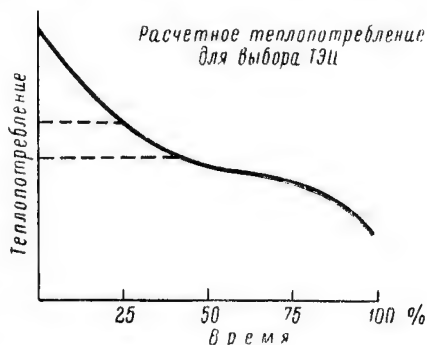


Рис. 4. График теплопотребления по продолжительности

При комплексном решении, оправданные экономическим расчетом мощности ГЭС и ТЭЦ, как правило, получаются значительно большими, чем при обособленном решении, за счет некоторого сокращения менее экономичных КЭС. Правда, суммарная мощность всех электрических станций в системе в этом случае часто получается несколько большей за счет дублирования ГЭС и ТЭЦ.

Однако, добавочные мощности оправдываются не только снижением себестоимости электроэнергии в системе за счет снижения расхода топлива, но и экономией в других отраслях народного хозяйства: более благоприятным режимом ГЭС для водного транспорта, ирригации и пр., возможностью более широкого охвата населения и промышленности централизованным теплоснабжением. Иногда же один киловатт добавочной мощности ГЭС плюс один киловатт ТЭЦ с противодавлением меньше по капитальным вложениям одного киловатта КЭС плюс стоимость местной котельной для отопления.

Применимость и выгоды рекомендуемого совместного выбора мощности и параметров ГЭС и ТЭЦ удалось проверить на практике. Так, например, в энергосистеме, имеющей ГЭС с многолетним регулированием, при проектировании теплоснабжения одного из промышленных центров, на основе выполненных специальной организацией, проектирующей тепловые станции, обычным методом расчетов была доказана целесообразность строительства там мощной центральной котельной, а не ТЭЦ. Произведенные рекомендуемым комплексным методом расчеты привели к совершенно противоположным выводам. На основании последних была построена ТЭЦ, оборудованная турбинами с противодавлением, строительство и эксплуатация которой подтвердили правильность сделанного выбора.

Другой случай практического применения рекомендуемой методики был при проектировании энергоснабжения одного из заводов, расположенного в сфере действия Куйбышевской ГЭС. Оказалось, что единовременные капитальные вложения при установке паровой турбины 6000 *квт* с противодавлением возросли по сравнению с сооружением только отопительной центральной котельной всего на 22% и это потребовало на 1 *квт* получаемой зимой мощности вложений в 2—3 раза меньше, чем КЭС. Эксплуатационные расходы по сравнению с котельной возросли лишь на 29%, что дало возможность иметь по 4,8 коп. на 1 *квт-ч* сезонной зимней электроэнергии, необходимой для компенсации зимнего снижения выработки электроэнергии на Куйбышевской ГЭС по водотоку. Проект указанной ТЭЦ получил утверждение. Одновременно мы пришли к заключению, что в зоне обслуживания Куйбышевской ГЭС, в том числе и в г. Москве, по отмеченным выше соображениям компенсации снижения выработки ГЭС, целесо-

образно пойти на широкое строительство отопительных ТЭЦ с противодавлением.

В качестве третьего примера можно привести проект электро-снабжения одного завода, имеющего свою малую ГЭС и присоединенного к электросети крупной энергосистемы. При этом оказалось, что, если взамен существующих на заводе восьми мелких отопительных котельных построить, с относительно небольшими капитальными дополнительными вложениями, не центральную котельную, как она до того проектировалась, а ТЭЦ с противодавлением, то завод в состоянии полностью покрыть всю годовую потребность в электроэнергии от собственных ГЭС и ТЭЦ, производя на протяжении года выгодный для обеих сторон обмен электроэнергией с энергосистемой. А именно, по имеющейся линии электропередачи представляется возможным давать от завода в систему энергию в период осенне-зимнего максимума и получать ее обратно лишь в летнее (преимущественно ночное) время — период вынужденных сбросов воды на крупных ГЭС системы, когда при наличии избытков воды еще имеется располагаемая мощность турбин, но сильно снижается потребление. Этот проект широко обсуждался на заводе с представителями энергосистемы и получил одобрение.

Возможность применения ТЭЦ с противодавлением в комбинации с ГЭС особенно ценна для сельских районов, относительно удаленных от крупных промышленных и населенных мест. Там при малой концентрации теплового потребления, экономически не целесообразно строить ТЭЦ с конденсационными частями и поэтому обычно ограничиваются сооружением местных центральных котельных. Относительно же простые и недорогие ТЭЦ с противодавлением в сочетании с местными малыми ГЭС, были бы вполне рентабельны. Кроме приведенных примеров, нам неоднократно приходилось убеждаться в целесообразности совместной эксплуатации отопительных ТЭЦ с гидроэлектростанциями.

Трудности, возникающие при комплексном решении использования ГЭС и ТЭЦ в энергосистеме из-за необходимости учета интересов различных отраслей народного хозяйства (электроэнергетической системы, водного транспорта, сельского хозяйства, отопления коммунальных и промышленных зданий) значительно меньше, чем они кажутся на первый взгляд. Успешность же проведения в жизнь комплексных проектировок гарантируется особенностью социалистического планового хозяйства и это наше преимущество перед капиталистическим хозяйством обязательно должно быть использовано.

ЛИТЕРАТУРА

1. Передовая статья, «Электрические Станции» № 1, 1954.

Поступила 1/VI 1955 г.

Канд. техн. наук, доц. К. В. БУЛГАКОВ

О РАЦИОНАЛЬНОМ СОСТАВЛЕНИИ И ВЫБОРЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВАРИАНТОВ

Крупнейшая роль в построении материальной базы коммунизма принадлежит электрификации, которая должна развиваться в полном соответствии с требованиями народного хозяйства, обеспечивая при этом надежное и наиболее экономичное энергоснабжение потребителей. В этом отношении особое народнохозяйственное значение имеет надлежащее составление и рациональный выбор вариантов энергетических установок, требуемых развитием электрификации страны.

Между тем до настоящего времени еще не имеется достаточно обоснованного и единообразного подхода к составлению и сопоставлению энергетических вариантов. Применяемые различные методы как в части составления, так и, особенно, в части выбора вариантов, не обеспечивают во многих случаях рационального решения задачи.

В настоящей статье дается основная характеристика предложенных автором методов для составления и сопоставления вариантов (метод комплексного рассмотрения и метод энергоэкономических критериев), с целью улучшить применяемые до сих пор методы с аналогичным назначением.

В основу обоих методов положено условие получения одинакового народнохозяйственного эффекта в каждом из рассматриваемых вариантов, задаваемого для соответствующего этапа развития советского народного хозяйства, с учетом основных хозяйственно-политических задач, наличных ресурсов и развития производительных сил в Советском Союзе, а также других условий и задач.

Метод комплексного рассмотрения

Данный метод определяет комплекс вопросов, подлежащих совместному рассмотрению, а именно — какие вопросы, или факторы, должны рассматриваться совместно с данным вопросом или объектом рассмотрения в каждом из вариантов и в какой мере следует учитывать в получаемых решениях взаимную связь рассматриваемых основных вопросов и соответствующих факторов для последующего уточнения таких решений.

Факторы подразделяются на исходные (Φ_u) и зависимые (Φ_z). Первые являются исходными для объекта рассмотрения и связываются с ним прямыми связями. Зависимыми называются факторы, зависящие от объекта, причем изменения количественных параметров зависимых факторов в ряде случаев влияют на величину соответствующих количественных параметров объекта или исходных факторов, имея с последними в таких случаях обратные связи. Подобные зависимые факторы называются зависимыми обратносвязанными факторами (Φ_{zo}).

На каждом из этапов решения задачи или проблемы должен одновременно рассматриваться только один из основных вопросов, являющийся объектом рассмотрения (O), вместе с соответствующими исходными и зависимыми факторами. При этом тот или другой вопрос, являющийся объектом рассмотрения на данном этапе решения задачи или проблемы, может служить исходным или зависимым фактором для объекта рассмотрения на другом этапе.

Метод комплексного рассмотрения состоит в следующем.

1. Устанавливаются имеющиеся для данного объекта рассмотрения O исходные факторы Φ_u , а также зависящие от него факторы, влияющие на количественные параметры объекта, т. е. зависимые обратносвязанные факторы Φ_{zo} (рис. 1). Зависящие от

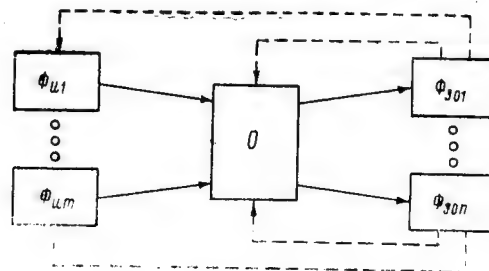


Рис. 1. Прямые (—) и обратные (---) связи объекта рассмотрения O с исходными факторами Φ_u и зависимыми обратносвязанными факторами Φ_{zo}

объекта факторы, не имеющие с ним обратных связей, непосредственных или косвенных (через исходные факторы), рассмотрению не подлежат, как не влияющие на получаемые решения.

2. Определяются максимальные возможные изменения количественных параметров рассматриваемого объекта в зависимости от изменений в возможных пределах количественных параметров соответствующих факторов вида Φ_n и $\Phi_{z.o}$ ($\Delta O_{\text{макс}}^{(\Phi_n)}$; $\Delta O_{\text{макс}}^{(\Phi_{z.o})}$).

3. Определяются погрешности (ошибки), получаемые при вычислении количественных параметров рассматриваемого объекта в функции от количественных параметров соответствующих факторов вида Φ_n и $\Phi_{z.o}$ ($\sigma O_{\text{макс}}^{(\Phi_n)}$; $\sigma O_{\text{макс}}^{(\Phi_{z.o})}$), вызываемые условными допущениями в определении исходных данных, неточностями в методах расчетов, измерений, построений и т. п.

4. Рассмотрению, совместно с объектом O , подлежат только такие факторы Φ_n и $\Phi_{z.o}$, для которых обуславливаемые ими погрешности в определении количественных параметров объекта рассмотрения меньше максимальных возможных изменений количественных параметров последнего в функции от количественных параметров соответствующих факторов, т. е. для которых

$$\Delta O_{\text{макс}}^{(\Phi_n)} > \sigma O^{(\Phi_n)}$$

и

$$\Delta O_{\text{макс}}^{(\Phi_{z.o})} > \sigma O^{(\Phi_{z.o})}.$$

Для остальных исходных факторов, имеющих для данного объекта, принимаются условно некоторые постоянные средние значения, а остальные зависимые факторы из рассмотрения исключаются, т. е. рассмотрение объекта упрощается при сохранении необходимой точности получаемых результатов.

5. После отбора подлежащих рассмотрению факторов, в первую очередь совместно с объектом рассматриваются исходные факторы. Затем определяются значения количественных параметров зависимых обратносвязанных факторов и производится соответствующее уточнение объекта рассмотрения, причем, при наличии косвенной обратной связи зависимого фактора с объектом через исходные факторы, сперва уточняются значения соответствующих исходных факторов.

Последовательное уточнение значений объекта и факторов прекращается после e уточнений, если дальнейшее уточнение значений объекта и факторов не превышает по величине соответствующих значений возможных погрешностей, т. е. если

$$\Delta O_e \leq \sigma O,$$

где

$$\Delta O_e = O_{e+1} - O_e,$$

причем e и $e + 1$ — порядковые номера последовательных уточнений объекта и факторов.

Таким образом, уточнение каждого из вариантных решений прекращается после того, как оно перестает влиять на выбор варианта объекта рассмотрения. В подавляющем большинстве случаев оказывается достаточным только одно уточнение значений количественных параметров объекта в функции от того или другого зависимого обратносвязанного фактора ($e = 1$).

На рис. 2 показана примерная комплексная связь объекта рассмотрения — теплофикационное энергооборудование ТЭЦ с исходным фактором — энергетическими нагрузками потребителей и зависимым обратносвязанным фактором — графиками электрической нагрузки энергоснабжающей системы.

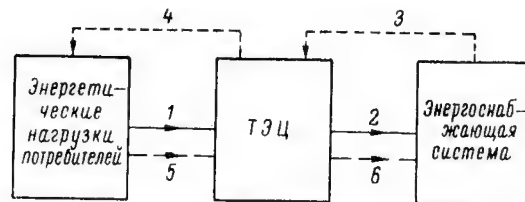


Рис. 2. Комплексная связь ТЭЦ с энергетическими нагрузками потребителей и энергоснабжающей системой

Исходный фактор в виде тепловых нагрузок потребителей энергии определяет (прямая связь 1 на рис. 2) теплофикационную мощность и энергию проектируемой ТЭЦ, участвующей (прямая связь 2) в покрытии графиков электрических нагрузок энергоснабжающей системы.

Такое покрытие графиков нагрузок системы определяет, в свою очередь (обратная связь 3), необходимый конденсационный хвост ТЭЦ и его использование.

Уточненное таким образом основное энергооборудование ТЭЦ оказывает влияние на покрытие графиков нагрузок рассматриваемых потребителей, на использование их вторичных энергоресурсов и т. д. (обратная связь 4).

Эти коррективы количественных параметров исходных факторов, в свою очередь, влияют на параметры и структуру ТЭЦ (уточненная прямая связь 5), что, безусловно, может влиять на структуру энергоснабжающей системы (уточненная прямая связь 6).

При практикуемом до настоящего времени составлении вариантов обычно не учитываются в должной мере исходные и зависимые обратносвязанные факторы и не производится уточнение

количественных параметров объекта рассмотрения, что может повлечь за собой выбор не наилучшего варианта такого объекта.

В частности, например, в вышеприведенном примере при проектировании ТЭЦ недостаточно учитывается возможное использование вторичных энергоресурсов потребителей в виде отработанного

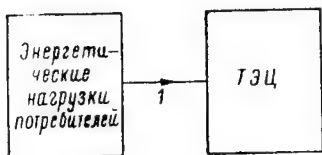


Рис. 3. Прямая связь ТЭЦ с энергетическими нагрузками потребителей, рассматриваемая как единственная другими авторами

производственного пара, отходящих горячих газов промышленных печей и т. д., не определяется необходимый конденсационный хвост ТЭЦ (рис. 3), причем не рассматривается вообще наиболее рациональное участие данной ТЭЦ в покрытии графиков нагрузки районной системы. Таким образом, обычно рассматривается только одна прямая связь I между энергетическими нагрузками потребителей и ТЭЦ.

Метод комплексного рассмотрения является исходным для метода энергоэкономических критериев.

Метод энергоэкономических критериев

Данный метод определяет критерии, необходимые для сопоставления и выбора вариантных решений как отдельных вопросов задачи или проблемы, так и последней в целом.

Выбор оптимального, т. е. наиболее отвечающего интересам народного хозяйства, варианта энергетического объекта должен производиться по минимуму суммарных фактических затрат живого и овеществленного труда, выражаемых в денежной форме и необходимых для получения заданного народнохозяйственного эффекта за расчетный период по тому или другому из рассматриваемых вариантов.

При этом суммарные издержки должны относиться к рассматриваемой энергетической системе в целом, с учетом взаимных связей основных элементов последней с другими элементами народного хозяйства (с топливной промышленностью, транспортом и т. д.), причем под энергетической системой понимается совокупность всех энергетических элементов от источников питания до энергоприемников включительно, со всеми энергетическими связями и промежуточными преобразовательными и распределительными установками.

По методу энергоэкономических критериев устанавливаются в каждом из рассматриваемых вариантов:

а) энергетические критерии, определяющие одинаковый энергетический эффект для всех вариантов, т. е. одинаковое обеспече-

ние качественных и количественных параметров обслуживаемых процессов и одинаковая степень надежности энергетического обслуживания последних в течение расчетного периода;

б) экономические критерии, обусловленные энергетическими критериями, в виде расчетного периода $t_{расч}$ и, соответствующей ему экономической характеристики рассматриваемого объекта Z_c , т. е. суммарных фактических невозвратимых затрат;

в) энергоэкономические критерии, а именно — сроки выравнивания величин экономических характеристик сравниваемых вариантов t_a и срок окупаемости превышения полных первоначальных затрат по более дорогому из сравниваемых вариантов за счет ежегодной экономии в средних прямых расходах по тому же варианту $t_{ок}$.

Величину расчетного периода, за который определяются энергетические критерии и соответствующие им экономические характеристики сравниваемых вариантов, следует принимать равным сроку средневзвешенной физической амортизации рассматриваемых установок ($t_{расч} = t_{аф}$) или равным сроку моральной амортизации установок, учитывающему моральное старение таких установок ($t_{расч} = t_{ам}$), в зависимости от соответствующего требования народного хозяйства к допустимой продолжительности срока окупаемости $t_{ок}$.

Экономическая характеристика рассматриваемого объекта определяет для любого года t_1 расчетного периода суммарные фактические невозвратимые затраты в виде суммы невозвратимых первоначальных затрат $\Sigma K_{нев}$ и суммарных прямых расходов $\Sigma I_{пр}$ по каждому из сравниваемых вариантов:

$$\begin{aligned} Z_{ct_1} &= K_0 + \sum_{t=1}^{t=t_1} I_{a,t} + \sum_{t=1}^{t=t_1} I_{пр,t} = \sum_{t=0}^{t=t_1} K_{нев,t} + \sum_{t=1}^{t=t_1} I_{пр,t} = \\ &= K_{нев,1} + \sum_{t=1}^{t=t_1} I_{пр,t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где K_0 — предварительные первоначальные затраты, произведенные до начала строительства объекта (на изыскание, проектирование и т. д.);

$I_a = \frac{K_{пер}}{t_{расч}}$ — годовые амортизационные отчисления;

$K_{пер} = K - K_0$ — первоначальные затраты на рассматриваемый объект с начала строительства;

$K = K_0 + K_{пер}$ — полные первоначальные затраты по рассматриваемому варианту;

$K_{нев,t}$ — невозвратимые первоначальные затраты за год с индексом t ; для $t=0$ $K_{нев,0} = K_0$; для $t = t_{расч}$ $K_{нев,t_{расч}} = K$;

$I_{np\ t}$ — прямые эксплуатационные расходы за год с индексом t .

Для конечного года расчетного периода ($t = t_{расч}$) значение экономической характеристики может быть выражено на основании (1) следующим образом:

$$\begin{aligned} Z_{ct_{расч}} &= \sum_{t=0}^{t=t_{расч}} K_{нев\ t} + \sum_{t=1}^{t=t_{расч}} I_{np\ t} = K + \sum_{t=1}^{t=t_{расч}} I_{np\ t} \\ &= K + I_{np\ ср} t_{расч}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $I_{np\ ср}$ — средние за расчетный период прямые годовые расходы

$$I_{np\ ср} = \frac{\sum_{t=1}^{t=t_{расч}} I_{np\ t}}{t_{расч}}. \quad (3)$$

Если прямые годовые расходы $I_{np\ t}$ значительно изменяются по величине за расчетный период, например при расширениях рассматриваемого объекта в течение этого периода, т. е. если $I_{np\ t} \neq I_{np\ ср}$, то целесообразно, для удобства определения $I_{np\ ср}$ выбрать варианта методом энергоэкономических критериев производить графически, построив для этого на общем графике соответствующие экономические характеристики сравниваемых вариантов за весь расчетный период.

В противном случае аналитическое определение $I_{np\ ср}$ по формуле (3) оказывается затруднительным.

При графическом построении экономических характеристик

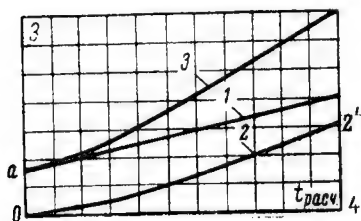


Рис. 4. Примерная экономическая характеристика энергетического объекта

Oa — предварительные первоначальные затраты K_0 , линия aI — суммарные амортизационные отчисления за расчетный период,

$$\sum_{t=1}^{t=t_{расч}} I_{np\ t}$$

определяется непосредственно, как один из компонентов экономической характеристики для последнего года расчетного периода, например, $2'-4$ из рис. 4.

Примерная экономическая характеристика энергетического объекта показана на рис. 4, где ордината

т. е. любая ордината этой линии для года t_1 расчетного периода

$$\sum_{t=0}^{t=t_1} K_{нев\ t} = K_0 + \sum_{t=1}^{t=t_1} I_{a\ t}.$$

Линия 0—2 обозначает суммарные прямые расходы, причем любая ордината этой линии для года t_1 расчетного периода

$$\sum_{t=1}^{t=t_1} I_{np\ t}.$$

Линия 0—3 изображает экономическую характеристику объекта, построенную за расчетный период.

При построении экономических характеристик необходимо учитывать принятую очередность во времени производства первоначальных затрат и очередность пуска в эксплуатацию отдельных частей объекта.

В состав первоначальных затрат и ежегодных прямых расходов по рассматриваемому объекту в каждом из сравниваемых вариантов должны также входить первоначальные затраты и ежегодные прямые расходы на обслуживание объекта смежными отраслями народного хозяйства (топливоснабжение, водоснабжение и т. п.), причем соответствующие ежегодные расходы должны при сравнении вариантов учитываться по себестоимости, аналогично расходам, обусловленным непосредственно работой самого объекта, т. е. без учета отчислений на воспроизводство.

Экономические характеристики сравниваемых вариантов дают возможность определить упомянутые выше энергоэкономические критерии t_a и $t_{ок}$.

Более общим из них является срок выравнивания величин экономических характеристик сравниваемых вариантов t_a , определяемый при графическом построении экономических характеристик, как абсцисса точки пересечения характеристик.

На основании (1), величина t_a определяется аналитически из соотношения соответствующих значений экономических характеристик:

$$\sum_{t=0}^{t=t_a} K_{нев\ t_I} + \sum_{t=1}^{t=t_a} I_{np\ t_I} = \sum_{t=0}^{t=t_a} K'_{нев\ t_{II}} + \sum_{t=1}^{t=t_a} I_{np\ t_{II}}.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} t \sum_{t=0}^{t=t_a} K_{нев\ t_I} - \sum_{t=0}^{t=t_a} K'_{нев\ t_{II}} &= \sum_{t=1}^{t=t_a} I_{np\ t_{II}} - \sum_{t=1}^{t=t_a} I_{np\ t_I} = \\ &= I_{np\ cp_{II}}^{(t_a)} t_a - I_{np\ cp_I}^{(t_a)} t_a \simeq I_{np\ cp_{II}} t_a - I_{np\ cp_I} t_a, \end{aligned} \quad (4)$$

где K_I и $K'_{II} = K_{II} \frac{t_{aI}}{t_{aII}}$ — полные первоначальные затраты, соответственно рассматриваемым вариантам I и II;
 t_{aI} и t_{aII} — сроки амортизации объекта, соответственно по вариантам I и II;
 $M_{нр,ср,I}^{(t_n)}$ и $M_{нр,ср,II}^{(t_n)}$ — средние годовые прямые расходы за промежуток времени t_n , соответственно по I и II вариантам;
 $M_{нр,ср,I}$ и $M_{нр,ср,II}$ — средние годовые прямые расходы за расчетный период $t_{расч}$, соответственно по вариантам I и II.

Из (4) определяется t_n :

$$t_n = \frac{\sum_{t=0}^{t=t_n} K_{нев} t_I - \sum_{t=0}^{t=t_n} K'_{нев} t_{II}}{M_{нр,ср,II} - M_{нр,ср,I}}. \quad (5)$$

Вторым энергоэкономическим критерием, основным по своему значению при выборе варианта, является срок окупаемости превышения полных первоначальных затрат по одному из вариантов за счет экономии в средних ежегодных прямых расходах по тому же варианту $t_{ок}$. Как правило, этот критерий $t_{ок}$ определяется аналитически на основании (5), принимая $t_n = t_{расч}$. Тогда

$$\sum_{t=0}^{t=t_{расч}} K_{нев} t_I = K_I$$

и

$$\sum_{t=0}^{t=t_{расч}} K'_{нев} t_{II} = K'_{II}.$$

Таким образом:

$$t_{ок} = \frac{K_I - K'_{II}}{M_{нр,ср,II} - M_{нр,ср,I}}. \quad (6)$$

Если $t_n = t_{расч}$, то и

$$t_{ок} = t_{расч};$$

если же $t_n < t_{расч}$, то и

$$t_{ок} < t_{расч},$$

причем $t_{ок} \neq t_n$.

В зависимости от соотношения величин компонентов экономической характеристики в рассматриваемых вариантах возможны вообще следующие основные случаи выбора одного из двух сравниваемых вариантов, показанные на рис. 5: для $K_{oI} > K_{oII}$ (рис. 5а, б и в) и для $K_{oI} = K_{oII}$ (рис. 5,г). При этом принимается $K_I > K'_{II}$.

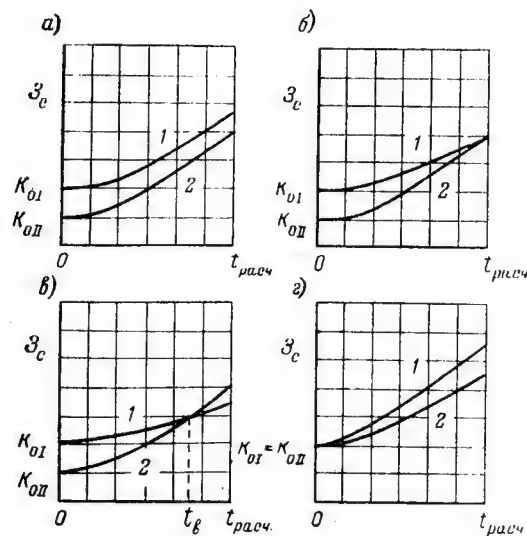


Рис. 5. Графическое сопоставление вариантных экономических характеристик

$$а) Z_{c\,t_{расч\,I}} > Z_{c\,t_{расч\,II}},$$

т. е., по (2):

$$K_I - K'_{II} > \sum_{t=1}^{t=t_{расч}} I_{np\,t_{II}} - \sum_{t=1}^{t=t_{расч}} I_{np\,t_I}. \quad (7)$$

Так как

$$\sum_{t=1}^{t=t_{расч}} I_{np\,t_I} = I_{np\,cp_I} t_{расч}$$

и

$$\sum_{t=1}^{t=t_{расч}} I_{np\,t_{II}} = I_{np\,cp_{II}} t_{расч},$$

то, подставляя эти значения в (7), имеем:

$$\frac{K_I - K_{II}}{I_{нр\ ср\ II} - I_{нр\ ср\ I}} > t_{расч}. \quad (8)$$

Левая часть (8) представляет собою срок окупаемости превышенных первоначальных затрат по варианту I за счет ежегодной экономии в соответствующих прямых расходах, сравнительно с вариантом II $t_{ок}$, который оказывается больше расчетного периода, а потому, даже если $I_{нр\ ср\ I} < I_{нр\ ср\ II}$, следует выбрать вариант II, для которого величина экономической характеристики за весь расчетный период в целом меньше, чем для варианта I (рис. 5,а).

$$б) Z_{с\ t\ расч\ I} = Z_{с\ t\ расч\ II},$$

т. е.

$$\frac{K_I - K_{II}}{I_{нр\ ср\ II} - I_{нр\ ср\ I}} = t_{расч}.$$

Таким образом, в конце расчетного периода имеет место выравнивание величин экономических характеристик (рис. 5,б).

В этом случае более целесообразно выбрать вариант I, хотя и более дорогой по первоначальным затратам, зато требующий меньшего расхода энергетических ресурсов, чем вариант II.

$$в) Z_{с\ t\ расч\ I} < Z_{с\ t\ расч\ II},$$

т. е.

$$K_I - K_{II} < \sum_{t=1}^{t=t_{расч}} I_{нр\ t\ II} - \sum_{t=1}^{t=t_{расч}} I_{нр\ t\ I}.$$

При этом срок выравнивания величин экономических характеристик вариантов I и II t_a , как показывает рис. 5,в, меньше расчетного периода $t_c < t_{расч}$.

Соответствующий срок окупаемости

$$t_{ок} = \frac{K_I - K_{II}}{I_{нр\ ср\ II} - I_{нр\ ср\ I}},$$

т. е. так же как t_a , меньше $t_{расч}$. Поэтому выбору подлежит вариант I.

$$г) Z_{с\ t\ расч\ I} > Z_{с\ t\ расч\ II},$$

т. е. данный случай аналогичен случаю *a*. Выбору подлежит вариант II (рис. 5,з).

Если прямые годовые расходы имеют более или менее неизменную в течение расчетного периода величину, т. е. $I_{пр\ I} \approx I_{пр\ ср}$, то вместо графического построения экономических характеристик за весь расчетный период для выбора варианта достаточно определить аналитически по (2) значение экономической характеристики по каждому из сравниваемых вариантов только применительно к последнему году расчетного периода в виде:

$$Z_{c\ t_{расч}} = K + I_{пр\ ср} t_{расч}.$$

Выбору подлежит тот вариант, для которого $Z_{c\ t_{расч}}$ имеет наименьшее значение, например вариант I.

Соответствующий срок окупаемости $t_{ок}$ для случая $K_I > K'_{II}$

$$t_{ок} = \frac{K_I - K'_{II}}{I_{пр\ ср\ II} - I_{пр\ ср\ I}}$$

оказывается при этом, как показано выше, меньше $t_{расч}$, если $Z_{c\ t_{расч\ I}} < Z_{c\ t_{расч\ II}}$ (рис. 5,з).

Как показывает сделанный выше анализ, во всех случаях при определении величины $t_{расч}$ указанным выше образом ($t_{расч} = t_{a\ ф}$ или $t_{расч} = t_{a\ м}$), выбору подлежит тот вариант, для которого суммарное значение экономической характеристики за последний год расчетного периода $Z_{c\ t_{расч}}$ является наименьшим.

При этом, если $t_a \leq t_{расч}$, то и $t_{ок} \leq t_{расч}$ — для более дорогого по первоначальным затратам варианта.

Поэтому, если требуется только, чтобы $t_{ок}$ не превышало принятого $t_{расч}$, без уточнения значения $t_{ок}$, — достаточно при графическом построении экономических характеристик, определять графически только срок выравнивания величин экономических характеристик, т. е. t_a , так как соотношения величин t_a и $t_{расч}$ и $t_{ок}$ и $t_{расч}$ имеют одинаковый характер.

Таким образом, предлагаемый метод энергоэкономических критериев заключается в следующем.

1. По каждому из вариантов рассматриваемого энергетического объекта, составленных при помощи метода комплексного рассмотрения, определяются энергетические критерии, дающие возможность получения одинакового заданного народнохозяйственного эффекта при требуемой степени надежности этого получения.

2. Определяются для каждого из вариантов экономические критерии, а именно:

а) расчетный период $t_{расч}$, принимаемый, смотря по требованиям народного хозяйства, равным сроку средневзвешенной физической амортизации рассматриваемых установок $t_{аф}$ или сроку моральной амортизации таких установок $t_{ам}$;

б) экономическая характеристика Z_c по каждому из сравниваемых вариантов, которая при переменных в течение расчетного периода прямых годовых расходах ($I_{прл} \neq I_{прср}$), строится графически за весь расчетный период для более удобного определения средних прямых годовых расходов $I_{прср}$; в противном случае, при $I_{прл} = I_{прср}$, достаточно определить только суммарные значения экономических характеристик сравниваемых вариантов, применительно к последнему году расчетного периода. По экономическим характеристикам сравниваемых вариантов получаются средние значения ежегодных прямых расходов по каждому варианту.

3. Полученные экономические характеристики дают возможность определить величину основного энергэкономического критерия, а именно — срока окупаемости превышения первоначальных затрат по более дорогому варианту за счет ежегодной экономии в средних годовых прямых расходах по тому же варианту $t_{ок}$, т. е. срока выравнивания полных первоначальных затрат и годовых прямых расходов по сравниваемым вариантам.

4. Выбору подлежит вариант с меньшей величиной экономической характеристики в конце расчетного периода, если получаемый для него срок окупаемости не превышает допустимого срока окупаемости.

При этом уточнение величины срока окупаемости для выбранного варианта производится только в случаях, когда оно является необходимым, например, когда каждый из нескольких сравниваемых вариантов имеет срок окупаемости (по отношению к третьему варианту) меньший расчетного периода.

В противном случае достаточно определить основное соотношение величин срока выравнивания экономических характеристик t_n и расчетного периода. Аналогичное основное соотношение будет иметь место в данном варианте и для величин его срока окупаемости $t_{ск}$ и расчетного периода.

5. Окончательный выбор варианта должен производиться с учетом степени удовлетворения добавочных требований народного хозяйства в отношении оборонных условий, здравоохранения, структуры материальных затрат, сроков сооружения и других.

При одинаковых экономических характеристиках и прочих равных условиях, выбору подлежит вариант с минимальными суммарными расходами энергетических ресурсов, в частности — топлива.

Энергэкономические критерии, предлагаемые другими авторами и проектными организациями для соизмерения первоначаль-

ных затрат (капиталовложений) и эксплуатационных расходов под названиями: «срока окупаемости», «срока расширенного воспроизводства», «срока возобновления затрат», «срока компенсирования» и т. д., содержат в числителе в подавляющем большинстве случаев суммарные капитальные затраты, без учета разной длительности амортизации элементов установок в сравниваемых вариантах.

При этом в знаменателе выражения, определяющего данный энергоэкономический критерий, помещается вместо предлагаемой разности прямых годовых расходов разность полных ежегодных расходов, включая и соответствующие амортизационные отчисления, что значительно завышает величину данного критерия и не соответствует основному экономическому закону социализма непрерывного роста и совершенствования социалистического производства на базе высшей техники. Следовательно, для сравниваемых вариантов должны предусматриваться амортизационные отчисления одинаковой величины, т. е. они не должны фигурировать в знаменателе данного экономического критерия.

Поэтому в ряде случаев пользование энергоэкономическими критериями других авторов не может привести к выбору оптимального варианта.

Ниже, в табл. 1 приводятся примерные сроки окупаемости $t_{ок}$ по методу энергоэкономических критериев и соответствующие значения срока окупаемости $t'_{ок}$, получаемые по методике, практикуемой другими авторами и проектными организациями.

Примерные значения $t_{ок}$ и $t'_{ок}$ (лет)

Таблица 1

	В а р и а н т ы			
	1	2	3	4
Энергоэкономический критерий	$t_{aI} = t_{aII}$	$t_{aI} = t_{aII}$	$t_{aI} = 1,6 t_{aII}$	$t_{aI} = 1,6 t_{aII}$
	$K_I = 1,2 K_{II}$	$K_I = 1,5 K_{II}$	$K_I = 2 K_{II}$	$K_I = 2,5 K_{II}$
	$I_{npI} = I_{aI}$	$I_{npI} = 0,9 I_{aI}$	$I_{npI} = 0,15 I_{aI}$	$I_{npI} = 0,1 I_{aI}$
	$I_{npII} = 1,5 I_{aII}$	$I_{npII} = 2 I_{aII}$	$I_{npII} = 2 I_{aII}$	$I_{npII} = 2,5 I_{aII}$
	$I_{aI} = 0,08 K_I$	$I_{aI} = 0,08 K_I$	$I_{aI} = 0,05 K_I$	$I_{aI} = 0,05 K_I$
	$I_{aII} = 0,08 K_{II}$	$I_{aII} = 0,08 K_{II}$	$I_{aII} = 0,08 K_{II}$	$I_{aII} = 0,08 K_{II}$
$t_{ок}$	8,3	9,6	3,4	5,3
$t'_{ок}$	25	40	8	10,5

Табл. 1 составлена для разных относительных значений средних взвешенных сроков полной амортизации энергетического объекта в двух сравниваемых вариантах t_{aI} и t_{aII} , разных значений суммарных первоначальных затрат по сравниваемым вариантам K_I и K_{II} и разных соотношений $I_{пр ср I}$ и I_{aI} , $I_{пр ср II}$ и I_{aII} .

Относительные значения I_a приняты в табл. 1 равными:

а) для вариантов 1—2:

$$I_{aI} = 0,08 K_I;$$

$$I_{aII} = 0,08 K_{II};$$

б) для вариантов 3—4:

$$I_{aI} = 0,05 K_I;$$

$$I_{aII} = 0,08 K_{II}.$$

При этом, на основании изложенного выше, значения $t_{ок}$ определяются по (6):

$$t_{ок} = \frac{K_I - K_{II}}{I_{пр ср II} - I_{пр ср I}},$$

а значения $t'_{ок}$ по формуле:

$$t'_{ок} = \frac{K_I - K_{II}}{(I_{пр ср II} + I_{aII}) - (I_{пр ср I} + I_{aI})}.$$

Как показывает табл. 1, срок окупаемости $t'_{ок}$ определенный по практикуемой доныне методике, может в несколько раз превышать срок окупаемости $t_{ок}$, полученный по методике, предлагаемой в данной статье. В таких случаях пользование энергоэкономическими критериями других авторов может приводить к выбору недостаточно рационального варианта (с меньшими полными первоначальными затратами).

Предложенные выше методы для составления и сопоставления энергетических вариантов могут быть применены, с соответствующими коррективами, для составления и выбора вариантов также в других областях народного хозяйства.

Поступила 25/XI 1957 г.

*Канд. техн. наук, доц. П. Н. МАТХАНОВ,
инж. Ю. А. ПЕТРОВ*

СХЕМА ДЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ КОММУТИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ В МОЩНЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Введение

В последнее время часто требуется генерирование электрических импульсов прямоугольной формы очень большой мощности (порядка десятков мегаватт) и высокого напряжения, превосходящих как мощности, так и номинальные напряжения существующих коммутирующих приборов — импульсных тиратронов и электронных модуляторных ламп. Проблема коммутирования и коммутирующих приборов в подобных импульсных установках является весьма острой. В связи с этим очень часто возникает необходимость в последовательном соединении импульсных коммутирующих приборов.

В этой статье дается краткое описание выполнения схемы последовательного соединения электронных и ионных коммутирующих приборов, с успехом примененной в некоторых мощных импульсных генераторах.

Последовательное соединение коммутирующих приборов осуществляется в хорошо известной схеме умножения Аркадьева—Маркса, но по сравнению с обычным исполнением принятая схема обладает рядом важных в конструктивном отношении достоинств.

Главнейшие выгоды использования схемы умножения для рассматриваемых целей таковы:

1. Цепи катодов всех ламп находятся нормально в паузах между импульсами под потенциалом земли; только в моменты отпирания ламп катоды и сетки ламп (кроме первой) получают кратковременно высокие импульсные потенциалы.

2. Распределение напряжения между лампами в паузах между импульсами получается наиболее благоприятным; автоматически, без специальных мер, исключаются перенапряжения на отдельных лампах.

3. Для заряда схемы требуется источник питания с напряжением значительно меньшим, чем амплитуда выходного импульсного напряжения (в зависимости от числа ступеней схемы).

При практическом выполнении схемы умножения с обычными электронными и ионными приборами возникает ряд трудностей, связанных с обеспечением:

- а) питания накалов последующих ламп, катоды которых получают высокие потенциалы;
- б) подачи смещений на управляющие и экранные сетки;
- в) подачи управляющих импульсов на сетки последующих ламп;

г) необходимой быстроты заряда цепочки накопительных конденсаторов, особенно при большой частоте посылок.

Применение отдельных изолирующих трансформаторов для питания накалов и сеток ламп делает схему весьма громоздкой и неудобной в конструктивном отношении.

В рассматриваемых ниже устройствах эти трудности в значительной степени преодолены и, таким образом, имеется возможность более широкого использования схемы умножения для генерирования мощных прямоугольных импульсов. Описание схемы дается для наглядности раздельно: для коммутирующих приборов типа тиратронов и электронных модуляторных ламп.

1. Схема умножения на тиратронах

Схема умножения с применением тиратронов для импульсного генератора с формирующей цепью представлена на рис. 1. Для

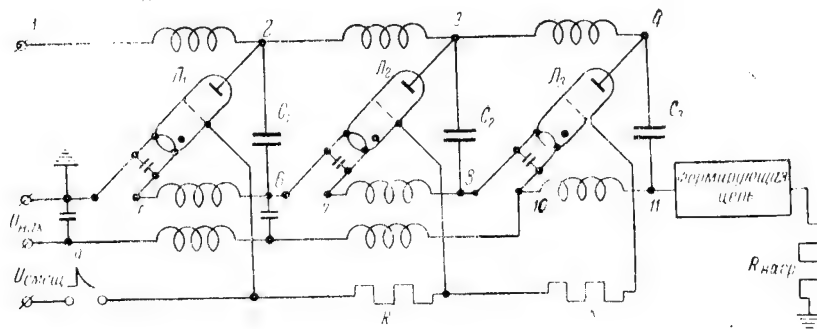


Рис. 1

определенности изображена трехступенчатая схема; вообще, схема может иметь n ступеней.

Основным элементом схемы, наряду с запасующими энергию конденсаторами C_1, C_2, C_3 и тиратронами L_1, L_2, L_3 , является многообмоточный дроссель со стальным сердечником, обмотки которого на схеме изображены в виде катушек индуктивности. Сердечник дросселя набирается из ленточной стали типа ХВП толщиной порядка 0,05—0,08 мм при длительностях импульсов от 1 мксек. и больше. Обмотки — однослойные, все с одинаковым числом витков. Схема обмоток дросселя изображена на рис. 2.

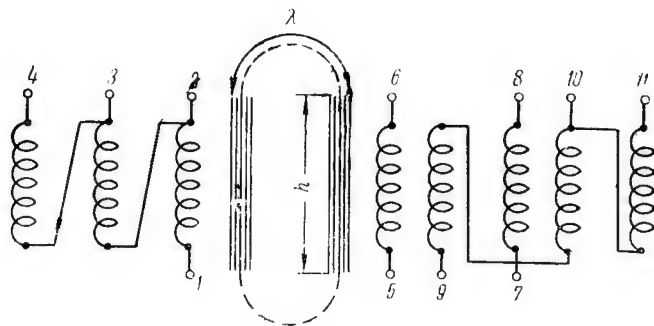


Рис. 2

По обозначениям концов обмоток можно сопоставить схемы рис. 1 и рис. 2 и убедиться, что катушкам верхнего плеча схемы рис. 1 соответствуют обмотки на левом сердечнике дросселя, а двойным катушкам нижнего плеча — обмотки на правом сердечнике.

Как можно видеть из схемы, накалы всех ламп питаются последовательно от одного общего источника, находящегося под потенциалом земли, через парные обмотки правого сердечника. Так как обмотки имеют одинаковое направление намотки, то потоки от прямого и обратного токов накала полностью компенсируются. При таком питании токи накала отдельных ламп получаются одинаковыми; если существенно получить одинаковые напряжения накалов, то следует включить соответственно подобранные шунтирующие сопротивления.

Заряд конденсаторов производится через соответствующие обмотки на левом и правом сердечнике; направления намотки этих обмоток таковы, что потоки от равных по величине прямых и обратных зарядных токов взаимно компенсируются. Поэтому заряд цепочки конденсаторов производится через небольшие по величине индуктивности рассеяния обмоток, что обеспечивает нуж-

ную быстроту заряда. При отпирании лампы ток разряда конденсаторов, кроме основной нагрузочной цепи, частично ответвляется в обмотки дросселя, но при этом потоки от всех ответвляющихся токов будут складываться. В результате, индуктивности обмоток будут иметь значительную величину, и, соответственно, токи ответвления могут быть ограничены до любого малого значения, требуемого условиями удовлетворительной работы всей схемы.

Напряжение смещения на сетки последующих ламп можно подавать различным образом. На рис. 1 показан простейший способ подачи смещения — от общего источника через высоковольтные большие сопротивления R (порядка десятка мегомов). Можно также подавать напряжения смещения на сетки последующих ламп через дополнительные обмотки, наложенные на соответствующие обмотки накала, как это сделано ниже в схеме с модуляторными лампами.

Управляющий импульс подается на сетку первой лампы. Отпирание первой лампы приводит к автоматическому отпиранию всех последующих ламп. При этом, как показали опыты, обеспечивается вполне четкая работа схемы. Автоматическое отпирание последующей лампы при отпирании предыдущей, очевидно, вызывается тем, что ее сетка из-за емкости на землю сохраняет на некоторое время свой прежний потенциал в момент, когда катод получает высокий отрицательный потенциал после отпирания предыдущей лампы.

Таким образом, из изложенного следует, что один дроссель заменяет ряд изолирующих трансформаторов питания накалов и устройств смещения для всех последующих ламп, а также все зарядные сопротивления, которые понадобились бы при обычном исполнении схемы. При этом кроме экономии и упрощения конструктивного выполнения достигается компактность всего устройства и возможность получения минимального контура для импульсного тока, что очень важно в случае генерирования коротких импульсов. Режим работы дросселя получается вполне идентичным с режимом работы импульсных трансформаторов, трансформирующих униполярные импульсы. Действительно, в паузах между импульсами магнитные потоки обмоток скомпенсированы и в сердечнике дросселя потока нет. Поток в сердечнике появляется только в момент отпирания ламп и растет во времени, достигая максимума в конце импульса. При этом во всех обмотках дросселя индуктируются импульсные напряжения, близкие по форме напряжениям на запасующих конденсаторах.

2. Схема умножения с модуляторными лампами

Трехступенчатая схема умножения с электронными модуляторными лампами (триодами) в качестве коммутирующих приборов

приведена на рис. 3. Схема обмоток дросселя аналогична схеме рис. 2. Из рассмотрения рис. 3 легко видеть, что питание накальных цепей ламп, а также заряд цепочки конденсаторов производится так же, как и в разобранный выше схеме с тиратронами. Напряжение смещения на управляющие сетки ламп подается через дополнительные обмотки, наложенные сверху накальных обмоток. Если лампы имеют экранные сетки, то смещения на эти сетки могут быть поданы таким же образом через новые дополнительные обмотки.

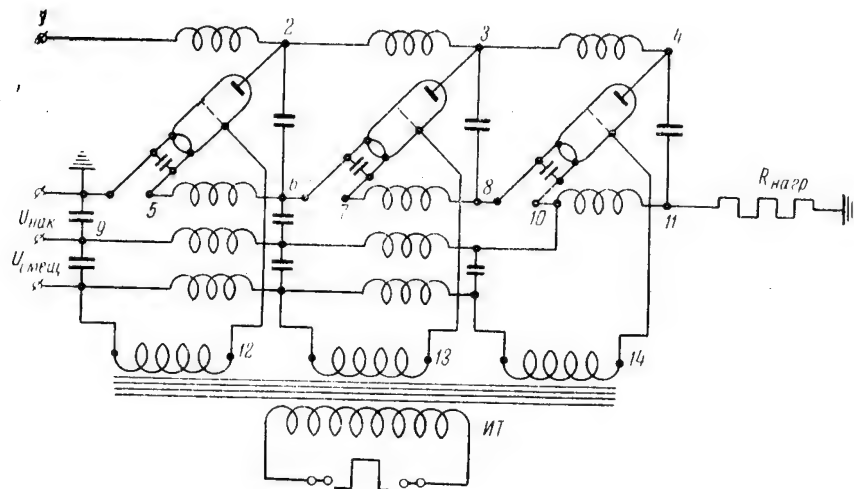


Рис. 3

Для подачи на сетки управляющих прямоугольных импульсов применяется специальный многообмоточный импульсный трансформатор, обозначенный на рис. 3 через ИТ.

При соответствующем правильном проектировании, форма импульсов различных обмоток получается практически одинаковой. Такой способ управления, как показали опыты, обеспечивает вполне удовлетворительную работу схемы при самых различных режимах.

Если схема импульсного генератора должна работать при фиксированном выходном напряжении, то можно обойтись без специального управляющего импульсного трансформатора: импульсы для управления последующими лампами могут быть получены при помощи соответствующим образом подобранных отпаяк от тех обмоток дросселя, по которым подводится смещение.

3. Проектирование дросселя

Проектирование дросселя должно вестись из основного условия ограничения до предельно-допустимой величины импульсного тока, отвечающего в обмотки дросселя при отпирании лампы. Наличие этого индуктивного шунта приводит к дополнительному разряду конденсаторов и снижению их напряжений или же к некоторому искажению выходного импульса.

Рассмотрим вначале расчет дросселя для схемы с электронными модуляторными лампами. Будем предполагать емкости запаасающих конденсаторов одинаковыми.

Так как обычно допустимое снижение вершины импульса бывает очень небольшим, то при пренебрежении спадом напряжения на конденсаторах можно приближенно принять, что ток, отвечающий в одну из обмоток дросселя, будет нарастать во времени по линейному закону. К концу импульса с максимальной расчетной длительностью его величина составит

$$I = \frac{U}{L} \tau, \quad (1)$$

где U — напряжение, до которого заряжены конденсаторы;
 L — индуктивность одной обмотки дросселя.

Предельно-допустимую величину тока легко связать с вызываемым им дополнительным спадом напряжения на конденсаторах ΔU , относительное значение которого не должно превосходить некоторой малой величины. После отпирания лампы каждый конденсатор (кроме последнего) дополнительно к нагрузке разряжается через две параллельно-соединенные обмотки дросселя; расходуемый при этом заряд при учете линейного нарастания тока составит

$$\Delta Q = \Delta UC = I\tau = \frac{U}{L} \tau^2. \quad (2)$$

Отсюда, индуктивность одной обмотки дросселя должна быть

$$L \geq \frac{U}{\Delta U} \frac{\tau^2}{C} = \frac{\tau^2}{\delta UC}, \quad (3)$$

где $\delta U = \frac{\Delta U}{U}$ — допустимая величина относительного дополнительного спада напряжения из-за тока в обмотках дросселя.

После установления нужной величины индуктивности обмотки дросселя, необходимо выбрать число ее витков N и сечение стали сердечника S [см²].

Так как поток в сердечнике создается $2n$ обмотками, которые обтекаются током I и имеют равное число витков N , то для индуктивности одной обмотки получим

$$L = \frac{4 \pi \mu_c N^2 S \cdot 2n}{l \cdot 10^9} \text{ [гН]}, \quad (4)$$

где l — средняя длина магнитной цепи, см;
 μ_c — эффективная магнитная проницаемость стали, учитывающая размагничивающее действие вихревых токов.

Величина μ_c меньше проницаемости стали при установившемся униполярном намагничивании и зависит от длительности импульса, удельного сопротивления и толщины листов; в руководствах по расчетам импульсных трансформаторов можно найти соответствующие графики для ее определения [1].

Средняя длина магнитной цепи будет зависеть от числа витков и конструктивного размера λ (рис. 2).

$$l = 2(h + \lambda) = 2(Nd + \lambda), \quad (5)$$

где h — высота обмоток;
 d — диаметр провода с изоляцией.

Величина λ может быть приблизительно оценена по предполагаемой ширине окна сердечника. Диаметр провода очевидно должен выбираться из эффективного значения суммарного тока, составляемого из токов накала, зарядного и импульсного.

С учетом (5), индуктивность выразится

$$L = \frac{2 \pi \mu_c N^2 S \cdot 2n \cdot 10^{-9}}{Nd + \lambda} \text{ [гН]}. \quad (6)$$

Выбор сечения сердечника и числа витков из (6) должен производиться кроме условия получения минимального размера сердечника также из того условия, чтобы напряженность магнитного поля в сердечнике

$$H = \frac{0,4 \pi NI \cdot 2n}{l} \text{ [э]} \quad (7)$$

находилась в области, где нет еще значительного насыщения. Для ленточной стали ХВП предельную величину H можно принимать примерно в 10—12 э.

Если при этом необходимо число витков получается слишком малым, что может привести к чрезмерной разности потенциалов между соседними витками, следует увеличить индуктивность дросселя.

Не представляет труда рассчитать по приведенным соотношениям несколько вариантов различных сечений и числа витков и выбрать из них наиболее приемлемый.

Следует иметь в виду, что индуктивность дросселя оказывает большое влияние на спад хвоста импульса после запырания лампы. Схема замещения переходного процесса здесь будет состоять из параллельно-соединенных заряженной емкости (нагрузки и паразитной), нагрузочного сопротивления и эквивалентной индуктивности дросселя $L_1 = L \left(1 + \frac{n}{2} \right)$ с начальным током I . Индуктивность L_1 будет убыстрять спад, но имеется возможность появления колебаний. Выбранное значение индуктивности дросселя должно быть проверено по условиям на хвосте импульса. Если появление колебаний неизбежно, то следует применить гасящие диоды.

Расчет дросселя для схемы с тиратронами должен производиться в таком же порядке. Основное отличие здесь состоит в том, что при открытии тиратронов напряжение на конденсаторах не остается постоянным, а спадает до нуля примерно по линейному закону; соответственно, ток, ответвляющийся в обмотки дросселя, будет меняться по иному закону. Именно, при приближенном приятии линейного спада напряжения на конденсаторах

$$U(t) = U \left(1 - \frac{t}{\tau} \right) \quad 0 < t < \tau$$

ток в обмотке дросселя будет нарастать по закону

$$i = \frac{U}{L} \left(t - \frac{t^2}{2\tau} \right) \quad 0 < t < \tau.$$

При прочих равных условиях ток здесь меньше, чем в случае постоянства напряжения. Поэтому дроссель, рассчитанный по выше-приведенным условиям, будет пригоден с некоторым запасом и для схемы с тиратронами.

Для обеспечения нужной изоляции дроссель должен помещаться в бак с маслом. Изоляция обмоток от стержней сердечника и друг от друга может быть либо чисто масляной, либо бумажно-масляной (кабельная бумага). Последний вид изоляции проще в выполнении.

Так как число наружных выводов дросселя довольно велико, то может оказаться целесообразным иметь крышку бака из изолирующего материала.

Расстояние между отдельными слоями-обмотками должно выбираться из условий:

- а) отсутствия разрядов (с запасом);

б) ограничения емкости между обмотками до некоторой допустимой величины. Слишком большая паразитная емкость может ухудшить форму выходного импульса.

Существенно оценить потери энергии в дросселе. Ввиду малого числа витков потери энергии в обмотках (в меди), как правило, невелики. Потери же в сердечнике будут состояться, главным образом, из потерь на вихревые токи, которые будут возникать при импульсном намагничивании листов стали. Оценка здесь может быть произведена так же, как это делается для импульсных трансформаторов [1].

Выводы

1. Описанные схемы позволяют относительно просто строить мощные импульсные генераторы с высокими выходными напряжениями, превышающими номинальные напряжения применяемых ламп.

2. Применением специального дросселя достигнут ряд очень существенных достоинств в отношении простоты и компактности конструктивного выполнения схемы.

3. На основе сведений, приведенных в статье, возможно проектирование дросселя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Детали и элементы радиолокационных станций, Перевод под ред. Ч. П. Брейтбарта, «Сов. Радио», 1952.

Поступила 10/X 1956 г.

Аспирант Е. А. ХАГЕМЕВ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА УСКОРЕННОГО АПВС КРУПНЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ

Введение

Ускоренное автоматическое повторное включение с самосинхронизацией (УАПВС) разработано и обосновано в работе автора [1].

В данной работе дается методика расчета (значительно упрощенная) электрических и гидромеханических процессов при УАПВС (рис. 1). Эта методика дает возможность в каждом конкретном случае, зная заводские данные генератора и турбины и имея материалы простейших стандартных опытов по сбросу номинальной нагрузки и гашению поля, рассчитать оптимальный для данного генератора (или эквивалентного генератора, если схема УАПВС охватывает несколько генераторов) процесс УАПВС, не прибегая к серии опытов по УАПВС, постановка которых требует специальной аппаратуры и значительного времени.

Данная методика расчета применима для сравнительно мощных тихоходных гидрогенераторов с полной демпферной системой на роторе. Гидротурбина предполагается поворотно-лопастного типа (Каплан-турбина). Возможность использования данной методики (в части расчета момента турбины) в случае агрегата с радиально-осевой турбиной (Френсис-турбина) требует дополнительной экспериментальной проверки на натурных гидроагрегатах.

Порядок проведения расчета динамики процесса УАПВС следующий:

1. Гидромеханические процессы.
 - а. Определение изменения скорости агрегата после сброса нагрузки.

6. Расчет изменения момента на валу турбины после сброса нагрузки.

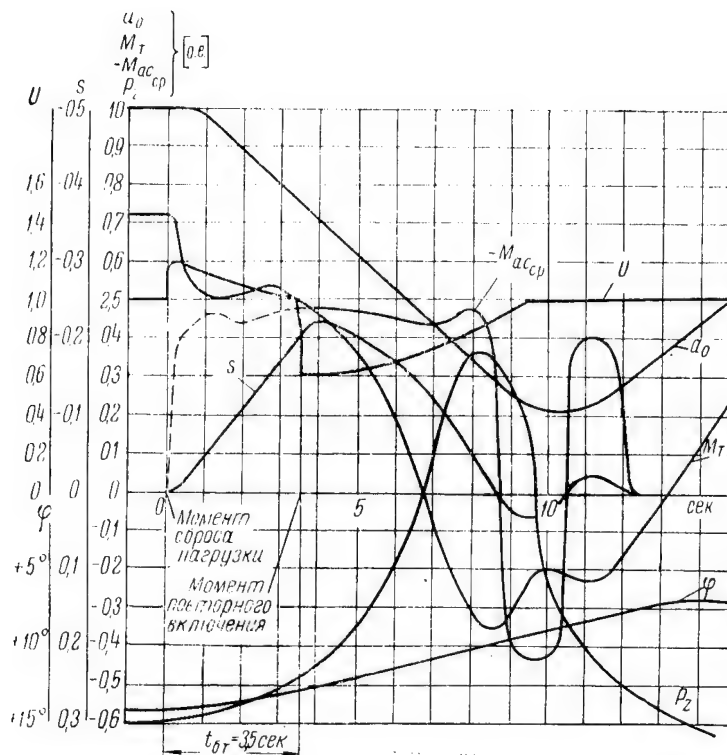


Рис. 1. УАПВС при $s = -0,20$; оптимальный момент включения; длительность бестоковой паузы $t_{0m} = 3,5$ сек. (пунктиром показано расчетное значение $M_{ac_{cp}} = f(s)$ при $U_c = 1$ о. е.).

2. Электромеханические процессы.

а. Гашение поля генератора.

б. Максимальный ток несинхронного включения генератора.

в. Асинхронный момент.

3. Расчет динамики процесса УАПВС.

Как показали опыт и расчет, оптимальным моментом времени включения генератора в систему является точка равенства момента турбины установившемуся асинхронному моменту генератора при данном скольжении.

1. Гидромеханические процессы

а. Изменение скорости гидроагрегата после сброса нагрузки. Изменение скорости вращения агрегата принимается с постоянным ускорением с момента сброса нагрузки до момента t_n достижения максимальной скорости вращения. Максимальные обороты n_m и время их достижения T_n берутся из стандартного опыта сброса номинальной нагрузки генератора (рис. 2).

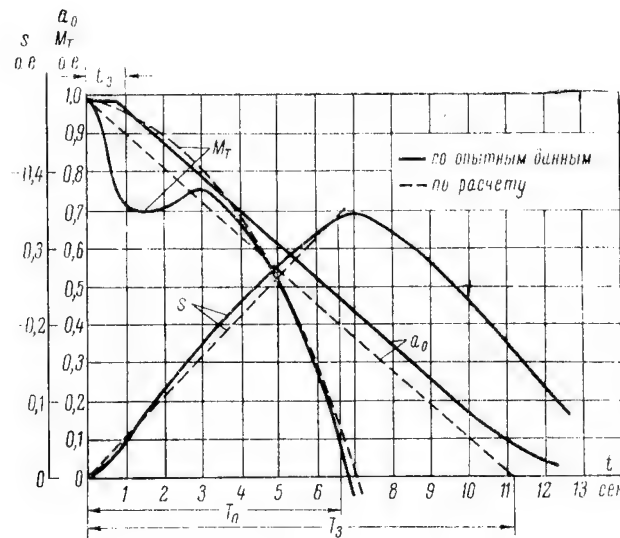


Рис. 2. Сброс нагрузки. Сравнение величин a_0 , s и M_T полученных из опыта сброса нагрузки и принятых для расчета

a_0 — ход направляющего аппарата гидротурбины (пунктиром — без учета времени запаздывания закрытия направляющего аппарата); M_T — момент на валу турбины; s — скольжение

б. Расчет изменения момента турбины после сброса нагрузки. При сбросе нагрузки направляющий аппарат гидротурбины закрывается с равномерной скоростью (кроме небольших участков начала и конца хода), так как уже при незначительном отклонении скорости от номинальной, регулятор скорости гидротурбины приходит в действие, и главный золотник становится на упор, пропуская максимальный расход масла в сервомоторы направляющего аппарата. Зная время полного закрытия направляющего аппарата при сбросе номинальной нагрузки гене-

ратора T_3 и полагая скорость закрытия равномерной, можно определить функцию $a_0 = f(t)$ как

$$a_{0t} = 1 - \frac{t}{T_3}. \quad (1)$$

Момент на валу турбины изменяется во времени по довольно сложному закону (рис. 2). Не рассматривая начального участка кривой изменения момента, можно вывести, с достаточной для практики точностью, зависимость момента на валу турбины (при сбросе нагрузки) от открытия направляющего аппарата. При этом надо поставить условием, что время закрытия лопастей рабочего колеса в 5—6 раз больше T_3 (что соответствует требованию Ленинградского металлического завода — поставщика гидротурбин). Если вести расчет в относительных единицах (о.е) при сбрасываемой мощности $P = 1$, то момент на валу турбины, как показывают результаты соответствующих испытаний, изменяется во времени по закону (приближенно) параболы (рис. 2)

$$M_T = 1 - \frac{t^2}{T_n^2}, \quad (2)$$

где T_n [сек.] — время достижения максимальных оборотов после сброса номинальной нагрузки. Тогда, объединяя (1) и (2), можно написать закон изменения момента на валу турбины в зависимости от открытия направляющего аппарата при сбросе нагрузки

$$M = 1 - \tau^2(1 - a_{0t})^2, \quad (3)$$

где

$$\tau = \frac{T_3}{T_n}.$$

В пределах $0,2T_3 < t < 1,2T_3$ это выражение дает хорошее совпадение с опытными данными.

2. Расчет электромеханических процессов

УАПВС, являясь промежуточным между АПВ без проверки синхронизма (АПВ б/с) и АПВС, ограничивается в данное время по максимальному току несинхронного включения $i_{нсМ}$, равному согласно условиям ТУ МЭС, трехкратному номинальному току генератора [1]. Таким образом, задача сводится к проверке по максимальному току $i_{нсМ}$, найденного в разделе 3 момента времени включения, с полученными для этого момента скольжением s и остаточным напряжением (э.д.с.) $U_{ост}$. Максимальный ток $i_{нсМ}$ зависит от $U_{ост}$ и s .

Остаточное напряжение находится по кривой гашения поля, скольжение — по характеристике разгона агрегата (см. раздел 1).

а. Гашение поля генератора. Сброс нагрузки с отключением короткого замыкания сопровождается повышением напряжения на выводах генератора. Однако, учитывая быстрдействие современных релейных защит линии электропередачи, можно полагать, что общий магнитный поток генератора к моменту отключения выключателя не успел изменить своего доаварийного значения.

Повышение напряжения можно приближенно определить по характеристике холостого хода генератора (рис. 3), рассчитав до-

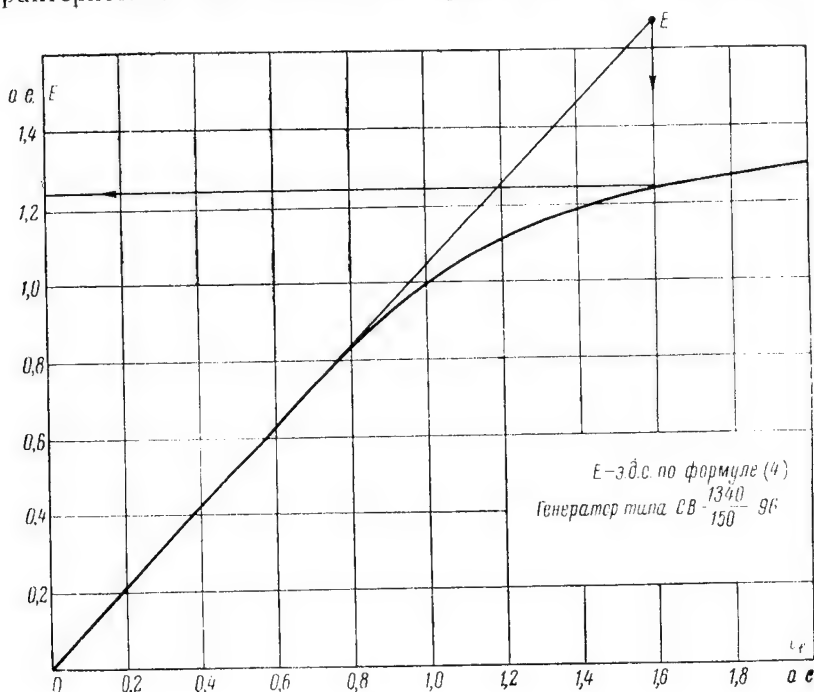


Рис. 3. Характеристика холостого хода гидрогенератора (по данным завода). К расчету повышения напряжения после сброса нагрузки

аварийную э.д.с. генератора E (на продолжении линейного участка характеристики холостого хода) по формуле

$$E = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + i_a x_d)^2}, \quad (4)$$

где i_a — доаварийный ток статора, о.е.;
 x_d — продольная реактивность генератора, о.е.;

U — доаварийное значение напряжения статора генератора, *о.е.*;
 $\cos\varphi$ — коэффициент мощности доаварийной нагрузки.

Опустив вертикаль из полученной точки, соответствующей значению э.д.с. E , (на продолжении прямолинейной части характеристики холостого хода) на реальную характеристику холостого хода генератора, получим истинное значение повышения напряжения на выводах генератора в *о.е.*

Процесс гашения поля начинается с данного максимального напряжения, а не с доаварийного (обычно близкого к номинальному) напряжения генератора, как это часто ошибочно принимают.

Гашение поля генератора можно осуществлять двояко: отключением автомата гашения поля генератора (АГП-Г) и отключением АГП возбуждателя (АГП-В).

Первый вариант является нормальным, однако, ввиду маломощности большинства установленных в настоящее время АГП-Г, дугогасящие контакты которого обгорают даже после однократного отключения рабочего тока возбуждения и требуют ремонта, непосредственное применение АГП-Г для целей УАПВС затруднительно.

Основным недостатком второго варианта является большая постоянная времени гашения поля (8—12 сек.), что сильно затягивает весь процесс [1].

С другой стороны, при отключении только АГП-В сильно уменьшается средний асинхронный момент генератора, так как его роторная обмотка возбуждения остается практически закороченной на обмотку якоря возбуждателя.

Таким образом, как показывает опыт, для целей УАПВС лучше всего применить комбинированный способ гашения поля: отключать сначала АГП-В, а по снижении $U_{ост}$ до $0,85 U_n$ — отключать от реле минимального напряжения АГП-Г. При этом дугогасящие контакты АГП-Г не обгорают, так как $0,85 U_n$ соответствует уменьшению мощности дуги на дугогасящих контактах примерно в три раза.

Постоянные времени гашения поля:
 на АГП-В

$$T_{с АГП-В} = T'_{до} + T_{1 до} + T_{ар}; \quad (5)$$

на АГП-Г

$$T_{с АГП-Г} = T'_{до} \frac{1}{1+m} + T_{1 до}, \quad (6)$$

где $T_{с}$ — постоянная времени гашения поля генератора на АГП-Г и АГП-В, сек.;

$T_{до}$ — постоянная времени демпферной обмотки ротора при разомкнутой обмотке статора, сек.;
 $T_{вв}$ — постоянная времени возбуждения возбудителя (обычно $T_{вв} \approx 5,5$ сек. для крупных гидрогенераторов);
 m — кратность гасительного сопротивления в цепи ротора генератора.

Принимая характер гашения поля примерно экспоненциальным (фактически T_z в начале процесса гашения поля на 10—15% меньше, чем в конце, из-за насыщения магнитопровода машины) можно написать

$$U = (U_{\max} - U_{ост\infty}) e^{-\frac{t}{T_z}} \quad [о. е], \quad (7)$$

где $U_{ост\infty}$ — остаточное напряжение генератора после завершения процесса гашения поля.

В случае применения ступенчатого гашения поля, момент срабатывания реле минимального напряжения, дающего импульс на отключение АГП-Г при $U = 0,85 U_n$,

$$t_{0,85} = T_{АГП-Г} \lg \left(\frac{0,85}{U_{\max} - U_{ост\infty}} \right) \lg e \quad [\text{сек.}] \quad (8)$$

и процесс гашения поля на АГП-Г с момента $t_{0,85}$

$$U = (0,85 - U_{ост\infty}) e^{-\frac{t - t_{0,85}}{T_{АГП-Г}}} \quad [о. е]. \quad (9)$$

б. Максимальный ток несинхронного включения. Максимальный ток несинхронного включения данного генератора зависит от:

- 1) его остаточного напряжения $U_{ост}$ к моменту УАПВС;
- 2) его скольжения в момент УАПВС;
- 3) суммарного реактивного сопротивления генератора и линии связи с системой.

Расчет остаточного напряжения дан в п. «а» данного раздела, скольжения — в разделе 1.

Максимальный ток несинхронного включения можно рассчитать по приближенной, неучитывающей затухание, формуле

$$i_{d_{н\kappa}} = - \left[\frac{U_c}{x''_d} + \frac{U}{x_d} \right] - \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \left(\frac{U_c}{s(1-s)T'_d} + U \right) - \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \left(\frac{U_c}{sT''_d} + U \right), \quad (10)$$

где U_c — напряжение системы, *о.е.*;
 U — напряжение генератора в процессе гашения поля к моменту включения МВ.

В (10) постоянные времени выражены в радианах, а реактивности определены как сумма реактивности генератора и линии электропередачи до приемных шин системы.

в. Асинхронный момент. Учет среднего асинхронного момента генератора при расчете динамики процесса УАПВС производится по выражению

$$M_{ас\kappa p} = - \frac{U_c^2}{2} \left[\left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{sT'_d}{1+(sT'_d)^2} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) \frac{sT''_d}{1+(sT''_d)^2} + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{sT''_q}{1+(sT''_q)^2} \right]. \quad (11)$$

Аналогично (10), в (11) постоянные времени даны в радианах, а реактивности учитывают реактивность связи с системой. Напряжение U_c — напряжение приемных шин системы в *о.е.*

При использовании (11) для расчета динамики процесса УАПВС предполагается, что все переходные процессы с постоянными времени T''_d и T'_d , а также обусловленные $U_{ост}$ (в процессе гашения поля), затухают через 0,5—0,6 сек. после включения генератора в систему. Это позволяет вести приближенный расчет по среднему асинхронному моменту. Зная изменение скорости вращения генератора во времени (см. раздел 1), можно построить изменение $M_{ас\kappa p}$ во времени для начальной части процесса сброса до момента t_n .

3. Расчет динамики процесса УАПВС

На ход процесса УАПВС оказывают влияние различные факторы электромеханического и гидромеханического порядка. Предлагаемый ниже метод расчета процесса УАПВС рассматривает лишь два основных фактора: движущий момент гидротурбины и тормозной момент генератора в асинхронном режиме. Расчет начинается с момента включения генератора в систему (рис. 4).

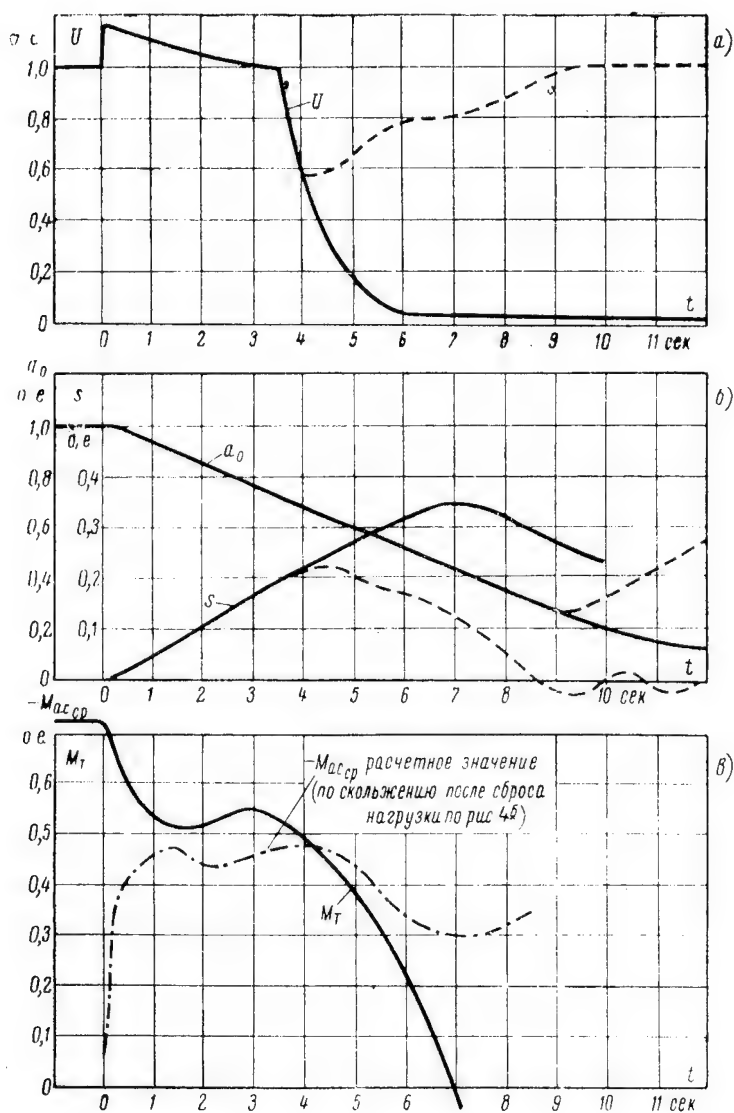


Рис. 4. Пример расчета процесса УАПВС
 а — изменение напряжения U ; б — изменение скольжения s и открытия направляющего аппарата a_0 ; в — изменение момента на валу турбины M_T и расчетного асинхронного момента M_{acr} генератора
 (сплошные линии — сброс нагрузки без включения в сеть; пунктир — УАПВС — включение на 4-й сек.).

Расчет динамики процесса удобнее всего производить методом последовательных интервалов в конечных разностях [4].

Общее уравнение движения гидроагрегата

$$M_T - M_{accp} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (12)$$

где $M_T(a_0)$ — момент гидротурбины;

$M_{accp}(\omega)$ — момент генератора.

Раскладывая в ряд (12)

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_0 + \frac{\partial M_{accp}}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial M_T}{\partial a_0} da_0, \quad (13)$$

обозначая

$$B_\omega = \frac{\partial M_{accp}}{\partial \omega} \text{ и } B_{a_0} = \frac{\partial M_T}{\partial a_0} \quad (14)$$

и решая (13) относительно $d\omega$

$$d\omega = \frac{M_0 + B_{a_0} da_0}{\frac{J}{dt} - B_\omega}, \quad (15)$$

или в конечных разностях

$$\Delta\omega_i = \frac{M_{i-1} + B_{a_0 i} \Delta a_{oi}}{\frac{J}{\Delta t} - B_{\omega_i}}, \quad (16)$$

где i — номер интервала.

Действующий на валу агрегата момент

$$M_i = M_{i-1} + B_{\omega_i} \Delta\omega_{i-1} + B_{a_0 i} \Delta a_{oi} \quad (17)$$

и (14) в конечных разностях

$$B_\omega = \frac{\Delta M_{accp}}{\Delta \omega}; \quad B_{a_0} = \frac{\Delta M_T}{\Delta a_0}. \quad (18)$$

Интервал времени Δt удобнее всего брать, как показала практика, в 0,2—0,3 сек.

Выводы

1. Проведение по данной методике расчета процесса УАПВС позволяет отказаться от проведения ряда испытаний гидроагрегата.

та, занимающие относительно много времени и требующие наличия специальной тензометрической и осциллографической аппаратуры.

Приведенная методика расчета динамики процесса УАПВС проверена по материалам натурных испытаний гидроагрегатов некоторых крупных ГЭС и дает, несмотря на ее сравнительную простоту, довольно близкое совпадение с результатами испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Хагемейстер, Ускоренное автоматическое повторное включение с самосинхронизацией (УАПВС), Известия ЛЭТИ, вып. XXXIV, 1958.
2. Л. Г. Мамиконянц, Токи и моменты вращения, возникающие в синхронной машине при включении ее способом самосинхронизации. Труды ЦНИЭЛ, вып. IV, Госэнергоиздат, 1956.
3. Ю. Е. Гаркави, М. И. Смирнов, Регулирование гидротурбин, Машгиз М.-Л., 1954.
4. В. А. Тиме, А. П. Мурзин, Е. А. Хагемейстер, Исследование работы гидроагрегата с быстродействующими затворами, расположенными в отсасывающей трубе. Технический бюллетень № 5 Ленинградского филиала Гидропроекта, Л., 1957.

Поступила 6/IV 1957 г.

Канд. техн. наук, доц. П. Н. МАТХАНОВ

**СИНТЕЗ ДИСКРЕТНЫХ ЦЕПЕЙ ЗАДЕРЖКИ НА ОСНОВЕ
ПРИБЛИЖЕНИЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ
ПЕРВЫМИ МНОЖИТЕЛЯМИ БЕСКОНЕЧНЫХ
ПРОИЗВЕДЕНИЙ**

Введение

В настоящее время расчеты цепей задержки из сосредоточенных элементов с постоянным временем задержки производятся преимущественно на основе частотных методов. Цепь задержки рассматривается как фильтр низших частот, который составляется из отдельных производных звеньев типа m , соединяемых каскадно. При подборе параметров звеньев основное внимание обращается на получение линейной фазовой характеристики результирующей цепи [1].

Так как основное требование, предъявляемое к цепям задержки, состоит в минимальном искажении формы импульса во времени, то более правильным является ведение проектирования цепей задержки с сосредоточенными элементами на основе синтеза цепей по заданной переходной функции.

При применении методов синтеза проектирование цепи задержки должно состоять из двух этапов: аппроксимации переходной функции или соответствующей ей системной функции и реализации полученной функции передачи цепи в виде конкретной схемы с данными всех элементов. При этом с практической точки зрения очень важно получение для заданной точности воспроизведения импульса наименьшего порядка цепи, а также сведение к минимуму требуемой вычислительной работы.

В работе Сторча [2], посвященной синтезу цепей задержки, для аппроксимации системной функции используется представление гиперболического котангенса через отношение функций Бессе-

ля от мнимого аргумента и разложение последнего в непрерывную дробь, данные Ватсоном. Такое представление, вообще, тождественно представлению экспоненты в виде таблицы Падэ.

В настоящей статье рассматривается синтез цепей задержки из сосредоточенных элементов, основанный на ином методе аппроксимации, а именно, на приближенном представлении гиперболического синуса и косинуса в виде первых n множителей соответствующих бесконечных произведений.

1. Приближение системной функции цепи задержки

Переходная функция идеальной цепи задержки со временем задержки τ имеет вид:

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < t < \tau; \\ 1 & \text{при } t > \tau. \end{cases} \quad (1)$$

Соответствующая системная функция идеальной цепи задержки

$$F(p) = e^{-p\tau} \quad (2)$$

является трансцендентной функцией комплексной частоты p .

Для решения задачи синтеза сначала необходимо произвести аппроксимацию функции (1) или (2), которая должна дать функцию передачи физически реализуемой дискретной цепи. Из ряда возможных способов аппроксимации, здесь приводится приближение системной функции (2) в комплексной частотной области, основанное на представлении гиперболических функций — синуса и косинуса через первые n множителей бесконечных произведений [3] и обладающее достоинством предельной простоты требующихся вычислений. В соответствии с принятым приближением системную функцию (2) можем представить, полагая длительность задержки $\tau = 1$ (нормировка),

$$e^{-p} = \frac{1}{\operatorname{sh} p + \operatorname{ch} p} = \frac{1}{p \prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{p^2}{k^2 \pi^2} \right) + \prod_{k=0}^n \left[1 + \frac{4p^2}{(2k+1)^2 \pi^2} \right]}. \quad (3)$$

Знаменатель правой части (3) является полиномом Гурвица. Таким образом, функция передачи искомой дискретной цепи задержки

$$G(p) = K \frac{1}{N(p)} = \frac{K}{N_1(p) + N_2(p)} = \frac{K}{p \prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{p^2}{k^2 \pi^2} \right) + \prod_{k=0}^n \left[1 + \frac{4p^2}{(2k+1)^2 \pi^2} \right]} \quad (4)$$

где N_1 и N_2 — соответственно нечетная и четная составляющие $N(p)$;

K — постоянный множитель, учитывающий затухание амплитуды импульса.

Верхний предел знака произведения n , определяющий число учтенных множителей в бесконечных произведениях, определяет, с одной стороны, степень достигаемого приближения, а с другой, порядок функции передачи (4), который равен $2(n+1)$. Число элементов реактивной цепи лестничного типа, реализующей эту функцию передачи, как увидим далее, равно $2(n+1)$. О связи между порядком функции (4) и искажением формы импульса на выходе можно приближенно судить, как это принято, по частотным характеристикам ($p = j\omega$).

Фазовая характеристика будет определяться

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{-jN_1(j\omega)}{N_2(j\omega)} = \operatorname{arctg} \frac{\omega \prod_{k=1}^n \left(1 - \frac{\omega^2}{k^2 \pi^2}\right)}{\prod_{k=0}^n \left[1 - \frac{4\omega^2}{(2k+1)^2 \pi^2}\right]}. \quad (5)$$

Квадрат амплитудной характеристики

$$M^2 = \frac{K^2}{N_1^2 + N_2^2} \Big|_{p=j\omega} = \frac{K^2}{\omega^2 \prod_{k=1}^n \left(1 - \frac{\omega^2}{k^2 \pi^2}\right)^2 + \prod_{k=0}^n \left[1 - \frac{4\omega^2}{(2k+1)^2 \pi^2}\right]^2}. \quad (6)$$

Представление полиномов N_1 и N_2 в виде произведений значительно облегчает вычисление частотных характеристик по (5) и (6).

Расчеты по (5) показывают, что фазовая характеристика получается практически линейной до частот $\omega_m \tau = \left(n + \frac{1}{2}\right) \pi$ или $f_m \tau = \frac{1}{2} \left(n + \frac{1}{2}\right)$. При предварительной оценке необходимого числа звеньев n , эта предельная частота должна быть несколько снижена с учетом затухания амплитудной характеристики.

2. Реализация полученной функции передачи

Перейдем теперь к реализации функции передачи, т. е. к нахождению схемы цепи с данными всех элементов.

Функция передачи цепи задержки (4) может быть легко реализована в виде реактивной лестничной цепи, нагруженной чисто активным сопротивлением $R_0 = 1$.

Предполагая для определенности, что $G(p)$ является безразмерной функцией передачи напряжений, разделим числитель и знаменатель (4) на четную часть знаменателя, имеющую более высокий порядок; тогда можем написать, принимая $K = 1$,

$$G(p) = \frac{y_{12}}{y_{22} + 1} = \frac{1 \cdot N_2}{N_1 N_2 + 1}, \quad (7)$$

где y_{12} и y_{22} — два элемента матрицы проводимостей четырехполюсника.

Если $G(p)$ является функцией передачи токов, то ее необходимо выражать через соответствующие два элемента матрицы сопротивлений. Отождествляя в (5) отдельно числитель и знаменатель, для элементов матрицы получаем:

$$y_{22} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{p \prod_{k=1}^n \left(1 + \frac{p^2}{k^2 \pi^2} \right)}{\prod_{k=0}^n \left[1 + \frac{4p^2}{(2k+1)^2 \pi^2} \right]}; \quad (8)$$

$$y_{12} = \frac{1}{N_2} = \frac{1}{\prod_{k=0}^n \left[1 + \frac{4p^2}{(2k+1)^2 \pi^2} \right]}.$$

Легко видеть, что эти параметры: а) удовлетворяют требованиям, предъявляемым к параметрам реактивной цепи; б) имеют одинаковые полюса и в) параметр y_{12} не имеет конечных нулей. При этих условиях искомая цепь легко может быть построена [4] — для этого достаточно входную проводимость y_{22} разложить в непрерывную дробь при помощи последовательного деления. Эта непрерывная дробь реализуется непосредственно в виде лестничной цепи справа налево (от конца к началу). Так как степень N_2 больше степени N_1 , то реализация цепи начинается (на правом конце) с последовательной ветви (индуктивности), что является условием правильной реализации по заданной y_{22} . Ввиду четности старшего полинома цепь будет оканчиваться (на левом конце) шунтовой ветвью — емкостью.

Вместо деления числителя и знаменателя в (5) на N_2 , можно, вообще, делить также на N_1 . Но тогда, для того, чтобы реализация y_{22} начиналась с последовательной ветви, следует верхний предел в знаке произведения для гиперболического синуса брать равным $n + 1$ вместо n — это обеспечит опять большую степень

знаменателя y_{22} , теперь нечетного. При этом цепь на левом конце будет оканчиваться последовательной индуктивностью. Таким образом, реализующая схема представляет лестничную LC цепь без потерь, обеспечивающую отсутствие затухания амплитуды импульса ($K = 1$).

В некоторых случаях, например, при задержке низкочастотных импульсов, бывает желательным учесть конечную добротность элементов. Для функций передачи вида (4) можно видоизменить процесс реализации для введения в схему активных сопротивлений за счет получения $K < 1$ [2,5]. Для этого следует ввести линейное преобразование вида $p = s - a$ ($s = p + a$). После подстановки в (4) получим новую функцию

$$G_a(s) = \frac{K_a}{N_a(s)}. \quad (9)$$

Для того, чтобы знаменатель $N_a(s)$ оставался полиномом Гурвица, значение a не должно выбираться слишком большим. Очевидно, функция передачи (9) может быть реализована также в виде лестничной цепи согласно описанному выше приему. Возвращение к исходной переменной, т. е. подстановка $s = p + a$, означает добавление к индуктивностям последовательных сопротивлений aL , а к емкостям — параллельных проводимостей aC , учитывающих потери. Постоянный множитель $K_a < 1$ характеризует снижение амплитуды импульса на выходе.

Следует отметить, что хотя принципиально рассмотренный процесс реализации очень прост, но при высоком n требуются все же довольно громоздкие вычисления; это обусловлено тем, что последовательное деление связано с вычитаниями и поэтому для обеспечения необходимой конечной точности результата вычисления должны вестись с достаточным числом значащих цифр.

3. Пример расчета цепи задержки

Примем для приближения гиперболических функций число множителей, соответствующее $n = 3$. Полагая на время $\frac{2p}{\pi} = \lambda$, имеем согласно (4)

$$N_1 = \frac{\pi}{2} \lambda \prod_{k=1}^3 \left(1 + \frac{\lambda^2}{2^2 k^2} \right) = \frac{\pi}{2} \prod_{k=1}^3 \frac{1}{2^2 k^2} \lambda \prod_{k=1}^3 (\lambda^2 + 2^2 k^2); \quad (10)$$

$$N_2 = \prod_{k=0}^3 \left| 1 + \frac{\lambda^2}{(2k+1)^2} \right| = \prod_{k=0}^3 \frac{1}{(2k+1)^2} \prod_{k=0}^3 [\lambda^2 + (2k+1)^2].$$

Перемножая между собой отдельные множители — двучлены, получаем:

$$N_1 = \frac{\pi}{1 \cdot 4 \cdot 9 \cdot 2^2} (\lambda^5 + \lambda^3 56 + \lambda^2 784 + \lambda 2304);$$

$$N_2 = \frac{1}{1 \cdot 9 \cdot 25 \cdot 4} (\lambda^8 + \lambda^6 84 + \lambda^4 1974 + \lambda^2 12916 + 11025). \quad (11)$$

Отношение этих полиномов дает интересующую нас величину — элемент матрицы проводимостей четырехполюсника y_{22} . Разложение в непрерывную дробь функции $\frac{1}{y_{22}}$ позволит реализовать соответствующую функцию передачи цепи задержки. Применяя последовательное деление, получаем следующую непрерывную дробь:

$$\frac{N_2}{N_1} = 0,1331 \left[\lambda + \frac{1}{\lambda 0,03572} + \frac{1}{\lambda 2,074} + \frac{1}{\lambda 0,03857} + \frac{1}{\lambda 2,356} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\lambda 0,04587} + \frac{1}{\lambda 3,263} + \frac{1}{\lambda 0,08755} \right]. \quad (12)$$

Для перехода к исходной переменной p необходимо все коэффициенты при λ в (12) разделить на $\frac{\pi}{2}$. На рис. 1а приводится соответствующая лестничная схема с данными всех элементов. На рис. 1б дается схема цепи задержки для $n=5$. Данные элемен-

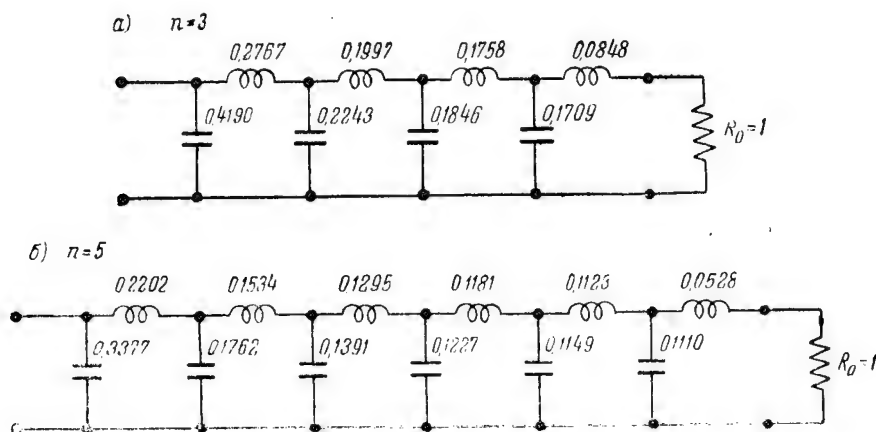


Рис. 1

тов схем относятся к нормированному времени задержки $\tau = 1$ и нормированному сопротивлению нагрузки $R_0 = 1$. При $\tau \neq 1$ и $R_0 \neq 1$ необходимо умножать значения индуктивностей на τR_0 и емкостей — на $\frac{\tau}{R_0}$. На рис. 2 приведены характеристики фазы и затухания при действительных частотах ($p = j\omega$) для цепи задержки с $n = 5$ (рис. 1б), вычисленные по (5) и (6).

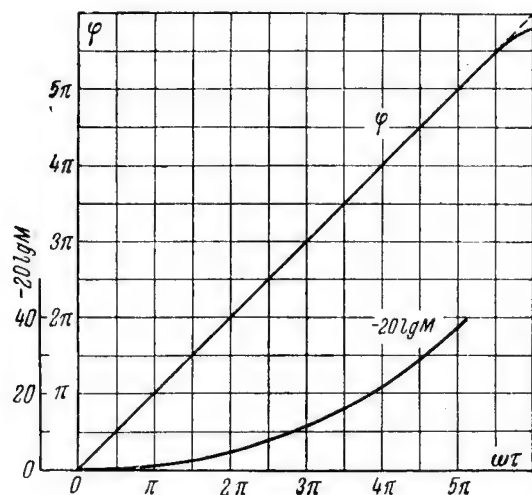


Рис. 2

Для экспериментальной проверки степени искажения формы импульса, по данным рис. 1б была построена линия задержки со

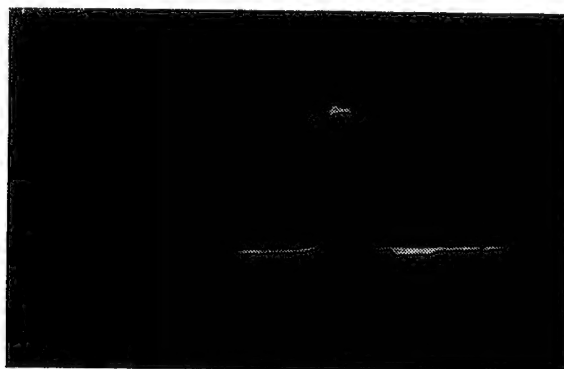


Рис. 3

временем задержки $\tau = 1 \cdot 10^{-6}$ сек. и сопротивлением $R_0 = 10^3$ ом. Величины элементов — индуктивностей и емкостей — подгонялись с точностью в пределах 1—2%.

На рис. 3 даны осциллограммы прохождения импульса длительностью $2 \cdot 10^{-6}$ сек. Из этих осциллограмм можно видеть, что временные характеристики цепи задержки получаются вполне удовлетворительными.

Выводы

На основании изложенного можно сделать следующие выводы по расчетам дискретных цепей задержки путем синтеза на основе представления гиперболических функций через первые n множителей бесконечных произведений.

1. Временные характеристики цепей задержки получаются вполне удовлетворительными.

2. Определение функции передачи цепи задержки производится предельно просто.

3. Также относительно просто производится реализация функции передачи. При необходимости, реализация может быть проведена с учетом конечной добротности катушек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Меерович, Л. Г. Зеличенко, Импульсная техника, «Сов. Радио», 1953.
2. L. Storch, Synthesis of Constant-Time Delay Ladder Networks Using Bessel Polynomials, Proc. of JRE, 42 № 11, 1954.
3. И. М. Рыжик, Таблицы интегралов, сумм и рядов, 1948.
4. Сборник, Корректирующие цепи в автоматике, 1954.
5. S. Darlington, Synthesis of Reactance 4-poles, J. of. Math. a. Phys., Vol. 18 sept., 1939.

Поступила 20/XI 1956 г.

Докт. техн. наук А. В. БАШАРИН

**ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ДРОССЕЛЬНОГО
МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ СИСТЕМ
АВТОРЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

В системах автоматического регулирования электроприводов постоянного тока исходными данными для проектирования и расчета магнитного усилителя являются параметры его нагрузки и заданный режим или режимы его работы.

Нагрузкой обычно является обмотка возбуждения машины постоянного тока, питаемая от магнитного усилителя через однофазный выпрямительный мост.

По условиям работы системы регулирования или управления известны потребные минимальное и максимальное значения тока в нагрузке, ее параметры (обычно для обмоток машин, питаемых от магнитного усилителя, целесообразно иметь наименьшее сопротивление). В большинстве случаев известно также напряжение источника (сети) переменного тока и могут быть выбраны параметры выпрямительного моста. Таким образом исходными данными для расчета магнитного усилителя можно считать:

- а) напряжение сети переменного тока;
- б) минимальное и максимальное значения тока нагрузки усилителя I_x и I_n ;
- в) сопротивление нагрузки при этих токах с учетом сопротивления вентилей R_x и R_n ;
- г) вольтамперную характеристику цепи нагрузки и выпрямительного моста. (Последнюю трудно получить расчетным путем на основании параметров нагрузки и характеристик вентилей).

Расчет магнитного усилителя целесообразно вести с учетом реальных режимов нелинейной цепи с вентилем и имеющимися искажениями формы кривых напряжения и тока. Такой расчет удобнее

всего вести графическим или графоаналитическим путем. Для возможности осуществления расчета необходим предварительный выбор размеров и конфигурации магнитной цепи.

1. Предварительный выбор параметров магнитной цепи

Для выбора параметров магнитной цепи воспользуемся приближенными соотношениями, получаемыми в предположении синусоидальности кривых тока и напряжения.

Для средних значений тока дросселя можно написать уравнение (рис. 1)

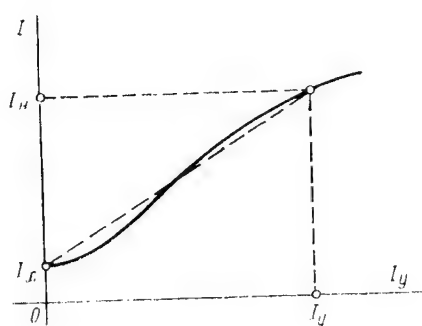


Рис. 1. Рабочая характеристика магнитного усилителя

$$I_n = I_x + K_m I_y.$$

С другой стороны

$$\frac{U}{K_\phi} = I_n \sqrt{X_{\partial n}^2 + R_n^2},$$

где $R_n = R_{os} + R_{\sim} + R_{\partial n}$ — полное активное сопротивление цепи нагрузки с учётом сопротивления вентилей;
 K_ϕ — коэффициент формы, переводящий действующее значение в среднее.

Обозначая через α отношение предельных токов нагрузки ($\alpha < 1$), т. е. $\alpha = \frac{I_x}{I_n}$ и подставляя α в первое уравнение, получим

$$K_m = \frac{I_n}{I_y} (1 - \alpha).$$

С учетом второго уравнения, будем иметь

$$K_m = \frac{U}{K_\phi I_y} \frac{1 - \alpha}{\sqrt{X_{\partial n}^2 + R_n^2}}.$$

При изменении тока дросселя от I_x до I_n реактивное сопротивление дросселя изменится от $X_{\partial x}$ до $X_{\partial n}$.

Обозначая

$$K = \frac{X_{\partial n}}{X_{\partial x}} \quad (K < 1),$$

подставим K в предыдущее выражение и возведем обе части в квадрат

$$K_m^2 = \frac{U^2}{K_\phi^2 I_y^2} (1 - \alpha)^2 \frac{1}{K^2 X_{\partial x}^2 + R_n^2}.$$

Полагая в первом приближении, что при холостом ходе напряжение источника питания полностью компенсируется э.д.с. дросселя, получим

$$U = 4K_{\phi} f \omega \sim SB_{\max} \cdot 10^{-8};$$

$$X_{\partial x} = 2\pi f L_{\partial x} = 2\pi f \frac{0,4 \pi \omega \sim^2 S \mu_0 \cdot 10^{-8}}{l}.$$

Определяя отношение

$$\frac{U^2}{X_{\partial x}} = 2,03 K_{\phi}^2 f \frac{B_{\max}^2}{\mu_0} V_{cm} \cdot 10^{-8}$$

и подставляя его в выражение для квадрата коэффициента усиления по току, получим

$$K_m^2 = 2,03 f \frac{B_{\max}^2}{\mu_0 I_y^2} V_{cm} \cdot 10^{-8} (1 - \alpha)^2 \frac{X_{\partial x}}{K^2 X_{\partial x}^2 + R_n^2}.$$

Дифференцируя полученное выражение по $X_{\partial x}$ и приравнявая производную нулю, находим оптимальное значение $X_{\partial x}$, при котором K_m^2 , а, следовательно, и K_m , имеют максимум

$$K_m^2 = A \frac{X_{\partial x}}{K^2 X_{\partial x}^2 + R_n^2}; \quad \frac{\partial K_m^2}{\partial X_{\partial x}} = A \frac{K^2 X_{\partial x}^2 + R_n - 2K^2 X_{\partial x}^2}{(K^2 X_{\partial x}^2 + R_n^2)^2},$$

откуда

$$X_{\partial x \text{ опт}} = \frac{K_n}{K} \text{ или } R_n = X_{\partial n}.$$

Подставляя $X_{\partial x \text{ опт}}$ в уравнение для K_m^2 и извлекая корень, получим для K_m

$$K_{m \text{ опт}} = \sqrt{\frac{2,03 f \cdot 10^{-8}}{\mu_0}} (1 - \alpha) \frac{B_{\max}}{I_y} \sqrt{V_{cm}} \frac{1}{\sqrt{2KR_n}}.$$

Полученную формулу можно несколько уточнить. Определим ток холостого хода нагрузки

$$I_x = \frac{U}{\sqrt{X_{\partial x}^2 + R_x^2}},$$

где $R_x = R_{\partial n} + R_{\sim} + R_{\partial n x}$,

подставляя в полученное выражение $X_{\partial x \text{ опт}}$, получим

$$I_x = \frac{UK}{R_n \sqrt{1 + \left(\frac{KR_n}{R_n}\right)^2}}.$$

Напряжение, уравнивающее э.д.с. дросселя

$$U_d = I_x X_{dx} = \frac{UK \frac{R_H}{K}}{R_H \sqrt{1 + \left(\frac{KR_x}{R_H}\right)^2}} = 4 K_\phi f \omega SB_{\max} \cdot 10^{-8},$$

откуда

$$U = \sqrt{1 + \left(\frac{KR_x}{R_H}\right)^2} \cdot 4 K_\phi f \omega SB_{\max} \cdot 10^{-8}.$$

Подставляя полученное выражение и уточняя выражение для K_{opt} , после несложных преобразований, получим

$$K_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{2,03 f \cdot 10^{-8}}{\mu_0}} (1 - \alpha) \frac{B_{\max}}{I_y} \sqrt{V_{\text{ст}}} \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{KR_x}{R_H}\right)^2}}{\sqrt{2 KR_H}}. \quad (1)$$

Для оптимального значения K на основании предыдущего нетрудно получить соотношение

$$K_{\text{opt}} = \frac{R_H}{\sqrt{\frac{U^2}{K_\phi^2 I_x^2} - R_x^2}}. \quad (2)$$

Для оптимального значения объема стали сердечника, получаем

$$V_{\text{ст opt}} = \frac{2 K R_H \mu_0 I_H^2}{2,03 f \cdot 10^{-8} \left[1 + \left(\frac{KR_x}{R_H}\right)^2 \right] B_{\max}^2}. \quad (3)$$

Для выбора параметров магнитной цепи, предварительно по исходным данным и формуле (2), определяется значение K .

По основной кривой намагничивания материала сердечника определяется кривая отношения $\frac{B_{\max}^2}{\mu_0}$ и выбирается значение B_{\max} , соответствующее максимуму этого отношения. По полученным данным и формуле (3) определяется расчетный объем стали.

Принимая конфигурацию сердечника заданной, по объему стали и стандартам величины для различных сталей (штампы для Ш-образных сердечников и ширина ленты для тороидальных), выбираем сечение сердечника и среднюю длину магнитосилового линии по пути переменной составляющей потока. Таким образом определяются основные параметры магнитной цепи: сечение $S [\text{см}^2]$ и средняя длина пути магнитосилового линии $l [\text{см}]$.

2. Пересчет исходной характеристики

Для удобства дальнейших расчетов, пользуясь параметрами предварительно выбранного магнитопровода, основную кривую намагничивания стали $B_m = f(H)$ пересчитываем на кривую

$$U = f(Iw),$$

где U и I действующие значения тока и напряжения.

Для пересчета пользуемся соотношениями:

$$Hl = Iw \quad (4)$$

и

$$U = 4,44 f w \sim SB_{\text{макс}} \cdot 10^{-8}. \quad (5)$$

Для заданного номинального напряжения сети число витков обмотки переменного тока определяется по максимальной индукции при холостом ходе из соотношения

$$U_{\text{сети}} = \sqrt{1 + \left(\frac{KR_x}{R_n}\right)^2} \cdot 4,44 w \sim f SB_{\text{макс}} \cdot 10^{-8}$$

т. е.

$$w \sim = \frac{U_{\text{сети}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{KR_x}{R_n}\right)^2} \cdot 4,44 f SB_{\text{макс}} \cdot 10^{-8}}. \quad (6)$$

Следует иметь в виду, что для для кольцевого сердечника пересчет производится непосредственно по формулам (4) и (5), а для Ш-образного величина Hl рассчитывается с учетом изменения величины потока по пути магнитосиловой линии, что удобнее всего сделать графически по методу, изложенному в книге Калантарова и Неймана «Теоретические основы электротехники», часть I.

Сечение обмотки переменного тока берется по нормам нагрева проводов, т. е. по допустимым плотностям тока. Определив сечение и число витков обмотки, следует определить площадь окна, ею занимаемую

$$Q = \frac{w \sim q \sim}{\eta},$$

где η — коэффициент заполнения обмотки переменного тока.

3. Расчет параметров управляющей обмотки и рабочих характеристик усилителя

Для расчета параметров управляющей обмотки и рабочих характеристик усилителя используются вольтамперные характеристики дросселя и активной части цепи, выраженные в масштабах

амплитуд. Получить эти характеристики нетрудно по найденным ранее характеристикам $U = f(I\omega)$ путем пересчета.

Так как обмотка переменного тока уже рассчитана, то целесообразно ее активное сопротивление приплюсовать к сопротивлению моста и нагрузки и построить результирующую вольтамперную характеристику активной части цепи.

В основу предлагаемого дальнейшего метода расчета положено предположение, что напряжение питающей сети синусоидально, а напряжение на дросселе и активной части цепи находится в квадратуре. В первом приближении предполагается также, что индуктивность нагрузки несущественно сказывается на форме рабочей характеристики усилителя.

Метод расчета сводится к следующему.

По основной вольтамперной характеристике, полученной для одного сердечника при отсутствии подмагничивания, строится семейство вольтамперных характеристик дросселя в целом (для двух сердечников) при различных значениях постоянной составляющей индукции B .

Для этого, отложив положительную и отрицательную ветви вольтамперной характеристики одного сердечника, проводят произвольную горизонталь, соответствующую некоторому значению постоянной составляющей индукции B_0 (линия Oa на рис. 2а). Через точку a пересечения этой горизонтальной с исходной вольтамперной характеристикой проводится вертикаль.

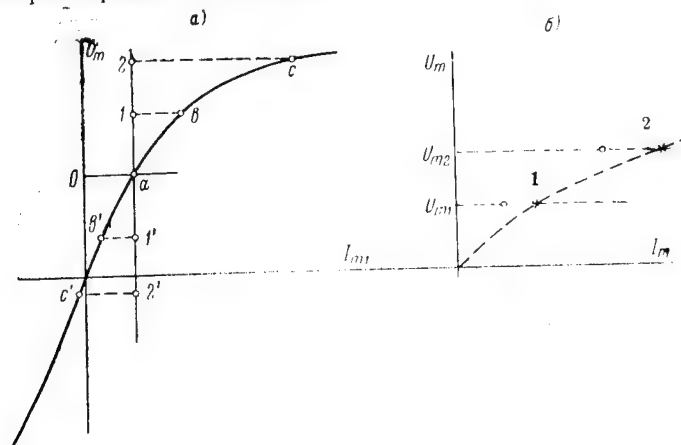


Рис. 2. Построение вольтамперных характеристик магнитного усилителя

Задаваясь значениями U_m , откладывают их вверх и вниз от горизонтальной Oa и определяют величину намагничивающего тока для одного и другого сердечника. Так, например, для U_{m1} величина

на тока для одного сердечника будет определяться отрезком $Iв$, а для другого — отрезком $I'в$. Суммируя эти значения токов и откладывая их при значении U_{m1} в отдельном квадранте, получаем точку искомой результирующей характеристики (точка 1 на рис. 2б). Для U_{m2} получаем значения токов, определяемые на рис. 2а отрезками $2с$ и $2'с'$, и, соответственно, точку 2 результирующей характеристики на рис. 2б.

Проведя аналогичные построения для различных значений постоянной составляющей индукции, т. е. для различных положений горизонтали Oa , получим искомое семейство результирующих вольтамперных характеристик дросселя при различных подмагничиваниях, пока неизвестных. Это семейство характеристик будет иметь вид, изображенный на рис. 3.

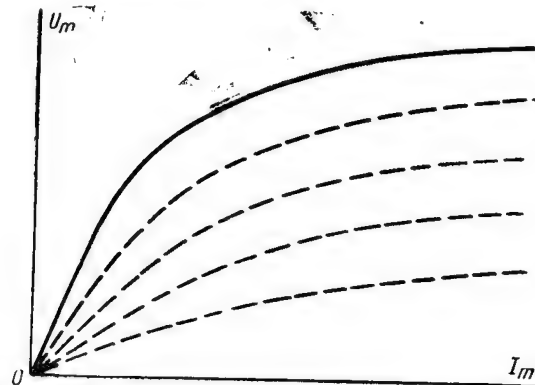


Рис. 3. Семейство результирующих вольтамперных характеристик магнитного усилителя

Полученное семейство снимается на кальку в виде транспонанта.

На миллиметровой бумаге в координатных осях $U_m — I_m$ откладывается вольтамперная характеристика активной части цепи. Полагая, для начала, подмагничивающий ток равным нулю, накладываем перевернутый транспонант (с тем, чтобы получить обращенную вольтамперную характеристику дросселя) на чертеж и перемещаем его так, чтобы начало координат транспонанта скользило по вольтамперной характеристике активной части (рис. 4). Перемещение производим до тех пор, пока вольтамперная характеристика дросселя, полученная при отсутствии подмагничивания, не пройдет через точку k пересечения горизонтали U_m сети с осью ординат. Полученная на вольтамперной характеристике активной части точка a' сносится на ось абсцисс (точка a) и отрезок Oa удваивается (точка b). Из полученной точки b с помощью

наложения обращенного транспоранта проводится вольтамперная характеристика дросселя $бв$. В нижнем квадранте откладывается зеркальное отображение этой кривой в оси абсцисс (линия $бв'$). Суммируя алгебраически ординаты вольтамперной характеристики активной части и вольтамперной характеристики дросселя, получим результирующую вольтамперную характеристику цепи при питании ее от сети переменного тока (линия $вб'в'$).

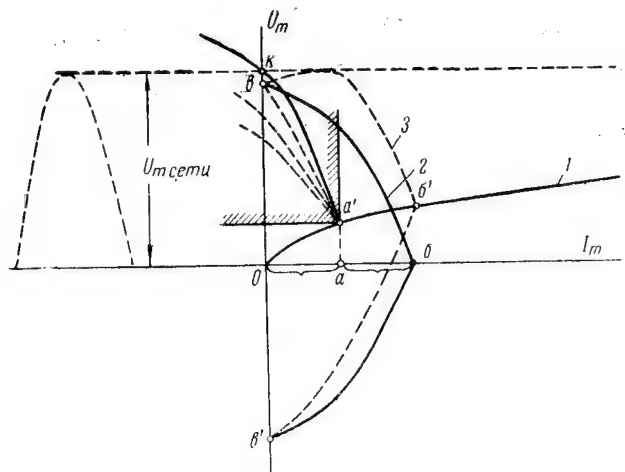


Рис. 4. Ход графических построений
1 — вольтамперная характеристика активной части; 2 — характеристика дросселя; 3 — результирующая характеристика

Может случиться, что после наложения транспоранта в точке $б$, вольтамперная характеристика дросселя выйдет за пределы амплитуды напряжения сети, определяемой горизонталью, проходящей через точку $к$.

В этом случае следует транспорант переместить по оси абсцисс влево настолько, чтобы суммарное напряжение на активной части и на дросселе при токе равно нулю было бы равно U_m сети, т. е. отрезку $Ок$ на оси ординат, и уже из полученной точки проводить вольтамперную характеристику дросселя.

По результирующей характеристике нетрудно рассчитать среднее и действующее значение тока в цепи с учетом нелинейностей характеристик и сложной формы кривых тока и напряжений. Как известно, среднее значение переменного тока в цепи нагрузки дросселя за период должно равняться нулю. С целью сокращения вычислений и графических построений удобнее вести весь расчет за половину периода тока от одного его нулевого значения до

другого, т. е. по результирующей характеристике цепи, лежащей правее оси ординат.

В соответствии с этим для дальнейших построений отложим слева синусоиду приложенного напряжения сети (рис. 5). Снося горизонталью на эту синусоиду точку b результирующей вольт-амперной характеристики цепи, соответствующую нулевому значению тока, примем полученную на синусоиде точку за отправную и проведем от этой точки вправо ряд вертикалей, отстоящих друг от друга на равных интервалах $\tau = 30^\circ$. Полученные пересечения вертикалей с синусоидой горизонталью сносят на результирующую вольтамперную характеристику (точки $b, 1, 2, 3, 4, 5, b'$).

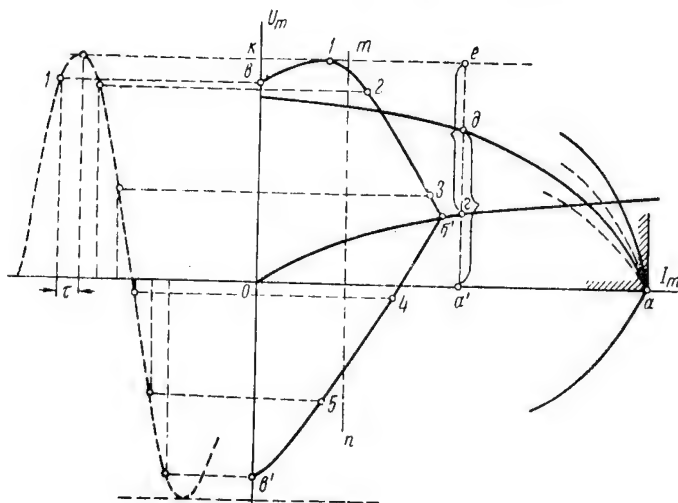


Рис. 5. К определению среднего и действующего значений тока усилителя

Абсциссы полученных точек суммируются и делятся на 7. Полученное среднее значение абсциссы будет определять положение нулевой линии.

Отложив найденное среднее значение по оси абсцисс, проведем в полученной точке вертикаль mn . Беря абсциссы точек $b, 1, 2, 3, 4, 5, b'$ результирующей вольтамперной характеристики на прежних горизонталях разбиения, но уже относительно проведенной вертикали mn , определяем действующее значение тока по формуле

$$I = \sqrt{\frac{1}{n} \left[I_{o2}^2 + I_{o3}^2 + I_{o4}^2 + \dots + \frac{1}{2} (I_{o1}^2 + I_{on}^2) \right]}. \quad (7)$$

Для определения кривой $I = f(I_y)$ поступаем следующим образом. Задаваясь произвольной амплитудой тока I_m , откладываем на оси абсцисс точку a , ей соответствующую (рис. 5). Поделив расстояние Oa пополам, получим точку a' . Проведя вертикаль, получим отрезок eg . Величину этого отрезка отложим от точки a' по вертикали (точка d).

Обращенный транспорант накладывается на чертеж таким образом, чтобы из семейства вольтамперных характеристик дросселя одна из характеристик прошла через точки a и d . Далее, суммируя ординаты вольтамперных характеристик активной части и дросселя, строим результирующую характеристику, аналогично изложенному ранее, определяем нулевую линию и вычисляем действующее значение тока цепи.

Может случиться, что ни одна из характеристик семейства не пройдет через точку d . Тогда из семейства характеристик дросселя выбирается характеристика, проходящая через точку на оси ординат, равную разности U_m и напряжения на активной части при $I_m = 0$ (в большинстве случаев это будет точка k). Остальное построение ведется аналогично.

Разность абсцисс нулевой линии рассматриваемой результирующей характеристики и нулевой линии mn характеристики, полученной при отсутствии подмагничивания, определит среднее значение тока управляющей обмотки, приведенное к параметрам обмотки переменного тока. Пересчет к параметрам обмотки управления для параллельного соединения обмоток переменного тока производится на основании соотношения, исходящего из равенства ампервитков.

$$I_y \omega_y = \frac{I_{np} \omega_{\sim}}{4},$$

где ω_{\sim} — полное число витков обмоток переменного тока.

Задаваясь желаемой величиной I_y управляющего тока, на основании приведенного соотношения определяют число витков обмотки управления

$$\omega_y = \frac{I_{np} \omega_{\sim}}{4 I_y} \quad (8)$$

и проверяют возможность укладки обмотки в окне магнитопровода.

Если число витков обмотки управления ограничено из соображений получения определенных параметров для «входа» усилителя, с целью рационального согласования с датчиком, то определив $I_y \omega_y$ и вычтя полученные ампервитки из определенного выше

значения подмагничивающих ампервитков, нетрудно определить параметры обмотки обратной связи, а именно

$$I_{cp} w_{oc} = \frac{I_{np} w_{\sim}}{4} - I_y w_y, \quad (9)$$

где I_{cp} — среднее значение переменного тока, определяемое из выражения

$$I_{cp} = \frac{1}{6} [I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5], \quad (10)$$

где $I_1; I_2; I_3; I_4; I_5$ — абсциссы точек результирующей характеристики относительно оси ординат, взятые по соответствующим горизонталям разбиения (рис. 5).

Выбрав параметры управляющей обмотки и обмотки обратной связи, нетрудно на основании изложенного выше привести расчет величин I и I_y , проводя повторные расчеты для различных точек, и построить кривую зависимости $I = f(I_y)$ для усилителя.

Эта кривая будет получена с учетом реальных условий работы усилителя, т. е. параметров нагрузки, нелинейностей цепей и сложной формы кривых напряжения и тока.

4. Пример

Для иллюстрации предлагаемого метода был произведен расчет характеристик готового усилителя, выполненного на Ш-образном сердечнике из стали марки Э4А.

Основные данные усилителя:

сердечник — Ш-40;

число витков обмотки переменного тока — 2×400 (обмотки соединены параллельно);

число витков обмотки постоянного тока — 2000;

число витков обмотки обратной связи — 160;

усилитель работал через однофазный выпрямительный мост из селеновых выпрямителей (диаметром 100 мм по 4 шайбы в плече) на активную нагрузку 15 ом.

Расчет характеристик усилителя был произведен по приближенному методу [1] и предлагаемым графоаналитическим методом. Эти же характеристики были получены экспериментальным путем.

На рис. 6 для сравнения приведены расчетные и экспериментальные рабочие характеристики усилителя.

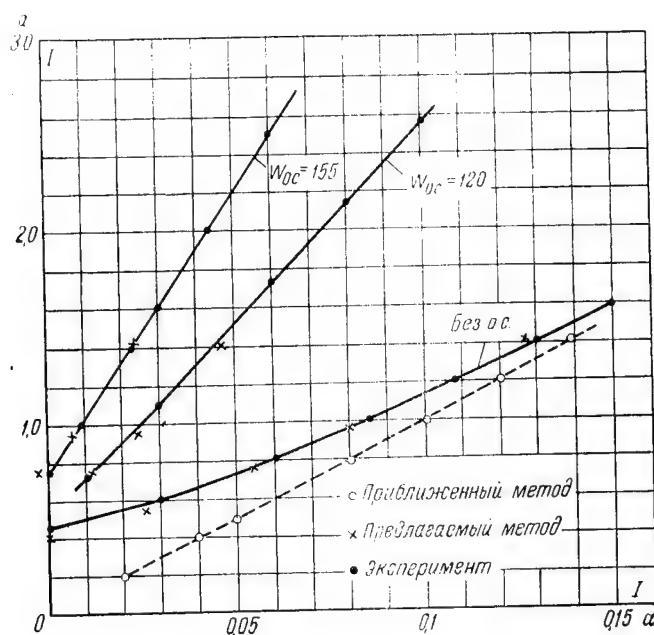


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные характеристики магнитного усилителя

Выводы

Предлагаемый графоаналитический метод расчета дроссельных магнитных усилителей и их характеристик при работе на нагрузку через выпрямительный мост достаточно прост и дает более точные результаты, нежели приближенный метод. Большая точность расчета достигается за счет учета нелинейностей характеристик дросселя и выпрямительного моста и сложной формы кривых напряжения и тока.

ЛИТЕРАТУРА

И. М. А. Розенблат, Магнитные усилители, Госэнергоиздат, 1948.

Поступила 20/XII 1955 г.

Ассистент Б. В. ШАМРАЙ

ГРАФИЧЕСКОЕ ПОСТРОЕНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХТАКТНЫХ МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

При необходимости изменения полярности выходного напряжения магнитного усилителя с изменением полярности усиливаемого сигнала применяются, как известно, двухтактные магнитные усилители, выполняемые обычно путем соответствующего соединения двух одноктактных усилителей.

В связи с тем, что положительная обратная связь наиболее просто, в сравнении с другими типами двухтактных усилителей, осуществляется при дифференциальных схемах, ограничим рассмотрение методики построения характеристик именно этими схемами (рис. 1).

Обратная связь в дифференциальных схемах выполняется либо раздельной (каждое плечо усилителя имеет свою отдельную обмотку обратной связи — схемы *а*; *с*; *е*), либо общей (усилитель имеет одну обмотку обратной связи, охватывающую оба плеча и включаемую последовательно с нагрузкой — схемы *в*; *д*; *ф*). Не останавливаясь на хорошо известных достоинствах и недостатках того или иного способа включения обратной связи, перейдем непосредственно к рассмотрению основных зависимостей, необходимых для построения нагрузочных характеристик.

Обычно, под коэффициентом обратной связи понимается отношение приращения постоянной составляющей напряженности поля обратной связи ΔH_{oc} , обусловленного током обратной связи, к соответствующему приращению среднего значения переменной составляющей напряженности поля ΔH_{cp}

$$K_{oc} = \frac{\Delta H_{oc}}{\Delta H_{cp}}$$

Однако, для двухтактных схем такое определение справедливо только в случае раздельной обратной связи, когда напряженность поля обратной связи является функцией среднего значения пере-

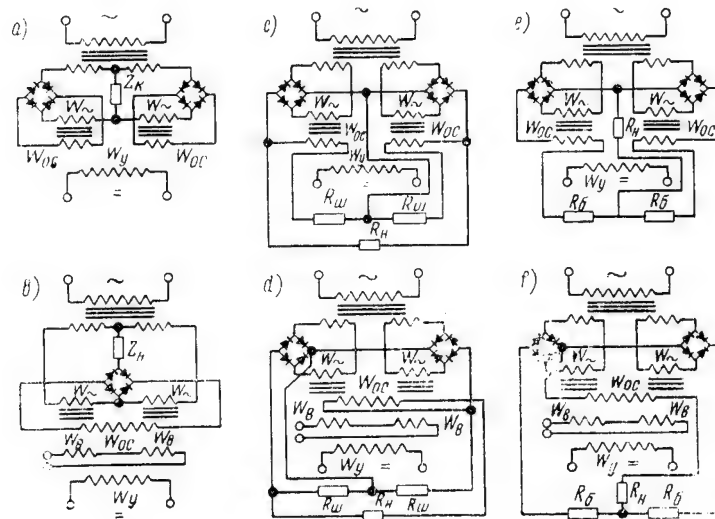


Рис. 1. Схемы двухтактных дифференциальных магнитных усилителей с внешней обратной связью

a, в — с выходом на несущей частоте; *c, d* — на постоянном токе с последовательным сместителем; *e, f* — на постоянном токе с параллельным сместителем

менной составляющей напряженности поля в плече усилителя. В случае же общей обратной связи напряженность поля обратной связи является функцией разности средних значений переменных составляющих напряженностей полей в различных плечах усилителя и под коэффициентом обратной связи следует понимать величину

$$K_{oc} = \frac{\Delta H_{oc}}{\Delta H_{cp1} - \Delta H_{cp2}}.$$

Кроме того, для усилителей с выходом на постоянном токе и раздельной обратной связью, напряженность поля обратной связи является не только функцией среднего значения переменной составляющей напряженности поля в плече, но также и функцией отношения переменных составляющих напряженностей полей в различных плечах. В последнем случае коэффициент обратной связи становится переменной величиной, а характеристика обратной связи нелинейной.

Для усилителей с выходом на постоянном токе необходимо учитывать также наличие и тип смесителя, существенно влияющего на величину коэффициента обратной связи.

Легко показать, что для дифференциальных схем двухтактных усилителей формула для определения коэффициента обратной связи может быть сведена к следующему общему выражению

$$K_{oc} = \frac{w_{oc} l_{\sim}}{l_o w_{\sim}} c, \quad (1)$$

где w_{oc} — число витков обмотки обратной связи;

w_{\sim} — число витков рабочей обмотки;

l_o и l_{\sim} — средние длины магнитного пути для постоянной и переменной составляющих потока;

c — коэффициент, учитывающий характер выхода и способ включения обратной связи, а для усилителя с выходом на постоянном токе и тип смесителя.

Для усилителей с выходом на несущей частоте, так же как и для усилителей с выходом на постоянном токе и отдельной обратной связью, при отсутствии сигнала на входе,

$$c = 1.$$

Для усилителей с выходом на постоянном токе и общей обратной связью

$$c = \beta.$$

Для усилителей с выходом на постоянном токе и отдельной обратной связью при наличии сигнала на входе в случае последовательного смесителя

$$c = \left[1 + \beta \left(\frac{\Delta H_{cp1}}{\Delta H_{cp2}} - 1 \right) \right], \quad (2)$$

а в случае параллельного смесителя

$$c = \left[1 + \frac{\Delta H_{cp1}}{\Delta H_{cp2}} (1 - \beta) \right]. \quad (3)$$

Коэффициент β входящий в выражение для определения величины c для усилителей с выходом на постоянном токе представляет собой коэффициент уменьшения тока в нагрузке за счет шунтирующих цепей смесителя. Его величина, строго говоря, зависит как от типа смесителя, так и величины и характера нагрузки и параметров и места включения обратной связи. Однако, в связи с тем, что влияние двух последних факторов (нагрузки и обратной связи) незначительно ($\beta_{посл} = 0,25 - 0,335$; $\beta_{нар} = 0,5 - 0,67$) с

достаточной для практики точностью можно принять для последовательного смесителя $\beta = 0,3$ и для параллельного $\beta = 0,6$.

Исходной кривой для построения нагрузочной характеристики двухтактного усилителя с обратной связью является зависимость $H_{cp} = f(H_o)$ для одного плеча усилителя. При построении указанной зависимости необходимо учитывать как изменение ее при включении дросселя в двухтактную схему, так и сопротивление цепи обратной связи.

Этот учет приближенно может быть достигнут заменой в расчетных формулах, при построении эллипса нагрузки, выбранного значения напряжения питания усилителя фиктивным значением

$$U_{\phi} = \frac{U_{\sim}}{X_{\phi}} \sqrt{X^2 + (R + r)^2}, \quad (4)$$

где U_{\sim} — расчетное значение напряжения питания;

X_{ϕ} — индуктивное сопротивление рабочих обмоток дросселя при отсутствии сигнала;

r — активное сопротивление рабочих обмоток;

X — полное индуктивное сопротивление цепи переменного тока;

R — эквивалентное активное сопротивление выхода усилителя, включая сопротивление нагрузки и обратной связи, а при выходе на постоянном токе, и сопротивления выпрямителей и смесителя.

Рассмотрим вначале, как более простое, определение нагрузочной характеристики усилителя с общей обратной связью. Для этого построим зависимость $H_{cp} = f(H_o)$ плеча усилителя (кривая EF , рис. 2), из которой, по выбранному значению начального подмагничивания H_o , легко получаем путем графического вычитания ординат характеристику $(H_{cp1} - H_{cp2}) = f(H_o)$ (кривая OD), представляющую собой в другом масштабе нагрузочную характеристику усилителя $I_n = f(I_y)$ без обратной связи.

Точка пересечения последней характеристики с осью абсцисс является новым началом координат, из которого под углом α проводится характеристика обратной связи ON ($\operatorname{tg} \alpha$ при одинаковых масштабах по осям координат равен коэффициенту обратной связи K_{oc}).

Так как $H_y = H_o - H_{oc}$, то построение зависимости $(H_{cp1} - H_{cp2}) = f(H_y)$ для усилителя с обратной связью сводится к графическому определению разности абсцисс характеристик OD усилителя без обратной связи и прямой обратной связи ON для одинаковых значений $(H_{cp1} - H_{cp2})$.

Как видно из рисунка, максимальный коэффициент обратной связи (на границе перехода в релейный режим)

$$K_{oc \text{ макс}} = \operatorname{tg} \delta,$$

где δ — угол наклона касательной к начальной части кривой.

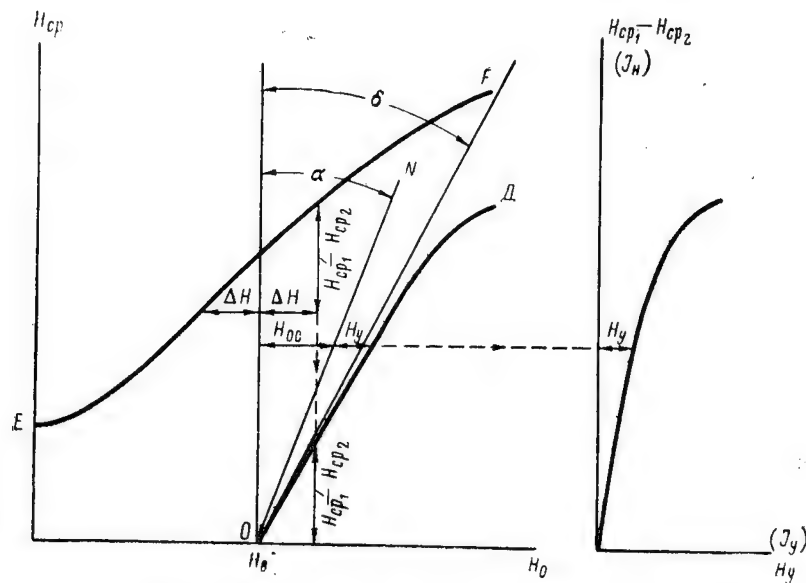


Рис. 2. Графическое построение характеристики усилителя с общей обратной связью

Отсюда становится ясным и метод предварительного подсчета ω_{oc} для усилителей с выходом на несущей частоте

$$\omega_{oc \text{ макс}} = \frac{\omega \sim I_0}{l \sim} \operatorname{tg} \delta, \quad (5)$$

для усилителей с выходом на постоянном токе

$$\omega_{oc \text{ макс}} = \frac{\omega \sim I_0}{l \sim 3} \operatorname{tg} \delta. \quad (6)$$

На практике ω_{oc} следует брать несколько меньшим, чем $\omega_{oc \text{ макс}}$, так как при значениях ω_{oc} , близких к $\omega_{oc \text{ макс}}$, усилитель работает неустойчиво.

Пересчет координат характеристики $(H_{cp1} - H_{cp2}) = f(H_y)$ для получения нагрузочной характеристики усилителя $I_n = f(I_y)$

общеизвестен и не может вызвать затруднений. Отметим только, что для усилителей с выходом на постоянном токе, после пересчета координат, абсцисса должна быть умножена на коэффициент β , учитывающий, как отмечалось ранее, уменьшение тока нагрузки, обусловленное наличием смесителя.

Построение нагрузочных характеристик для усилителей с раздельной обратной связью будем проводить исходя из того условия, что необходимое начальное подмагничивание при отсутствии сигнала должно создаваться обмотками обратной связи за счет токов холостого хода в плечах. Тогда число витков обмотки обратной связи может быть определено из выражения

$$\omega_{oc} = \frac{H_0 l_{oc} \omega_{\sim}}{H_{cp0} l_{\sim}}, \quad (7)$$

где H_{cp0} — среднее значение переменной составляющей напряженности поля в плече при отсутствии сигнала на входе.

При раздельной обратной связи построение нагрузочной характеристики отличается тем, что вначале, по имеющейся характеристике $H_{cp} = f(H_0)$ плеча усилителя и характеристике обратной связи, строится характеристика $H_{cp} = f(H_0)$ плеча усилителя с обратной связью, а затем из последней путем вычитания ординат $(H_{cp1} - H_{cp2}) = f(H_y)$.

Основные трудности здесь вызывает само построение характеристики обратной связи для усилителей с выходом на постоянном токе, в связи с тем, что коэффициент обратной связи величина переменная, определяемая выражениями (1), (2) или (3).

Для построения характеристики обратной связи поступаем следующим образом (рис. 3). Определив по (1) значение K_{oc1} , при отсутствии сигнала (положив $C = 1$) и по формулам (1) с учетом (2) или (3), $K_{oc \text{ макс}}$ и $K_{oc \text{ мин}}$ при максимальном и минимальном отношениях $\frac{H_{cp1}}{H_{cp2}}$, проводим три характеристики обратной связи и получаем точки А; В; С, через которые должна пройти действительная характеристика обратной связи. Соединив точки А, В и С плавной кривой, получим линию с достаточной для практических целей точностью, совпадающую с характеристикой обратной связи.

Очевидно, что за значения H_{cp1} и H_{cp2} , соответствующие максимальному и минимальному отношениям, берутся значения H_{cp} при $H_0 = 0$ и $H_0 = 2H_*$.

Для усилителей с выходом на переменном токе характеристика обратной связи — прямая линия (ОВД), построение которой не может вызвать затруднений.

Полученная в результате построения зависимость $(H_{cp1} - H_{cp2}) = f(H_y)$ представляет собой в другом масштабе тре-

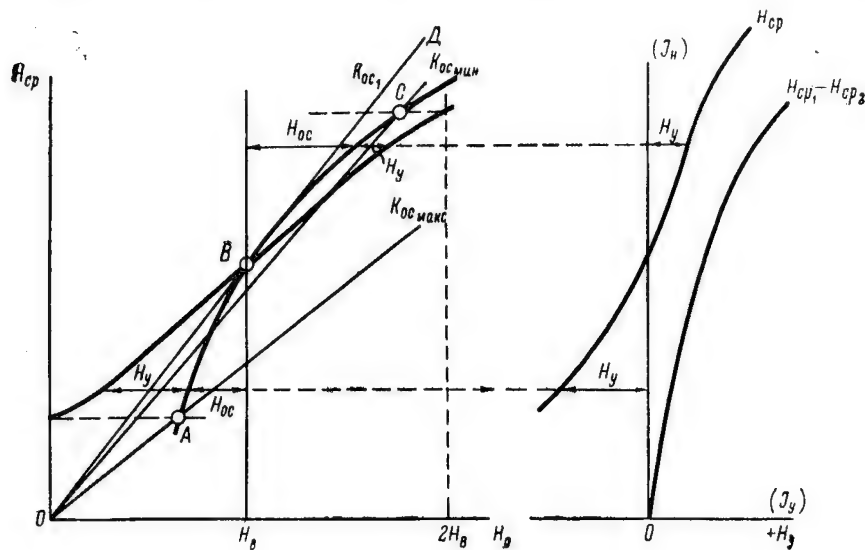


Рис. 3. Графическое построение характеристики усилителя с раздельной обратной связью

буемую нагрузочную характеристику $I_n = f(I_y)$ усилителя с обратной связью. Последняя находится пересчетом координат, который не отличается от рассмотренного выше пересчета при общей обратной связи.

Поступила 17/III 1957 г.

Канд. техн. наук Е. А. СТАРОСЕЛЬЦЕВА

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ИЗОЛЯЦИИ ПОРЯДКА 10^{18} ом·см

Внедрение во многие отрасли промышленности Советского Союза радиотехнических и телевизионных устройств требует от кабельной промышленности увеличения выпуска различного типа радиочастотных кабелей, обладающих высокими электрическими характеристиками.

Качество выпускаемых промышленностью кабелей во многом зависит от параметров его изоляции.

Для производства высококачественных радиочастотных кабелей и подводных кабелей связи требуется применение изоляционных материалов, обладающих высокой электрической прочностью, большим удельным сопротивлением, малым тангенсом диэлектрических потерь.

К подобным изоляционным материалам относится полиэтилен и его композиции с полиизобутиленом, полистирол, широко применяемые в кабельной промышленности. Завод «Севкабель» в послевоенные годы наладил производство подводных кабелей в больших длинах, а также радиокабелей с полиэтиленовой изоляцией.

Применение заводом высококачественных изоляционных материалов требует специальных установок для измерения их электрических параметров и, в первую очередь, наличия метода измерения высоких удельных сопротивлений изоляции.

Настоящая статья содержит изложение некоторых данных, полученных при разработке метода измерения удельных сопротивлений полиэтиленовой изоляции порядка $(10^{17} — 10^{18})$ ом·см.

Измерение высокоомных сопротивлений относится к сложнейшим задачам измерительной техники. Это объясняется тем, что практически при этом сталкиваются с измерением очень слабых токов, в нашем случае токов порядка $(10^{-14} — 10^{-15})$ а.

Чаще всего измерение высокоомных сопротивлений производится на основании закона Ома или методом заряда конденсатора и требует применения высокочувствительных гальванометров. В этом случае предел величины измеряемого сопротивления ограничен $(10^{14} - 10^{15}) \text{ ом}$; $\rho = (10^{15} - 10^{16}) \text{ ом} \cdot \text{см}$.

Методом заряда конденсатора с использованием струнного электрометра (прибора, обладающего чувствительностью 10^3 делений на вольт), возможно измерить сопротивление изоляции порядка 10^{15} ом ($\rho = 10^{17} \text{ ом} \cdot \text{см}$).

Метод, однако, не применим в заводских условиях ввиду значительного времени, требуемого на производство измерения, и крайним неудобством работы со струнным электрометром.

Установку для измерения высокоомных удельных сопротивлений, обладающую высокой чувствительностью, пренебрежимо малым потреблением, малой постоянной времени и простотой в работе можно создать используя специальные электрометрические лампы.

Промышленностью выпускаются некоторые типы электрометрических ламп, обладающие пренебрежимо малыми сеточными токами и, следовательно, большими входными сопротивлениями. Таковы лампы типа «Жолудь» 6Ж1Ж, 6К1Ж, ЭМ-2, ЭМ-3, 1Э1П и 2Э2П.

Из пальчиковых ламп типа 2Э2П, при условии предварительного отбора и тренировки, можно получить экземпляры с сеточным током

$$I_g = (2-3) \cdot 10^{-15} \text{ а.}$$

Применив электрометрическую лампу в качестве входного каскада усилителя в электронном мегомметре, получим прибор, обладающий большим входным сопротивлением и высокой чувствительностью. Известен ряд схем электронных мегомметров, использующих электрометрические лампы: например, прибор для измерения удельных сопротивлений жидких диэлектриков, так называемый «Ро-метр» (ЛЭТИ), «Мегомметр с обратной связью» для измерения высокоомных радиосопротивлений (ИРПА). Однако, параметры электрометрических ламп в этих приборах не дают возможности измерить удельные сопротивления твердых диэлектриков выше $10^{16} \text{ ом} \cdot \text{см}$.

В предлагаемом методе измерения удельных сопротивлений изоляции было решено использовать «потенциометрическую» схему включения неизвестного R_x и известного R_0 сопротивлений при неизменном напряжении источника ($U_0 = 500 - 1000 \text{ в}$). Схема приведена на рис. 1. Падение напряжения U на известном сопротивлении измеряется электронно-ламповым вольтметром, состоя-

щим из входного электрометрического каскада ЭК, усилителя постоянного тока К и стрелочного магнитоэлектрического прибора.

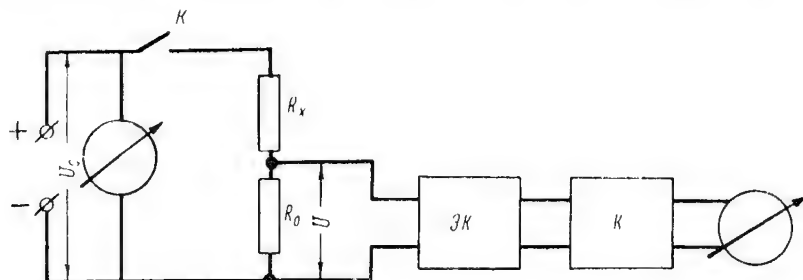


Рис. 1. Скелетная схема

Вольтметр измеряет падение напряжения за счет тока сквозной проводимости через исследуемое сопротивление изоляции.

Как известно, действительное сопротивление изоляции, характеризующее ее свойства, может быть найдено из формулы

$$R_{ск} = \frac{U}{i - \sum i_k},$$

где i — наблюдаемый ток через изоляцию;

U — приложенное напряжение;

$\sum i_k$ — сумма токов, вызванных дипольной, структурной и междуслойной поляризацией.

Существует формула, связывающая эти токи с параметрами измерительной цепи, позволяющая определить выдержку времени, необходимую для получения действительного тока сквозной проводимости.

При известном и постоянном напряжении источника величина измеряемого сопротивления вычисляется по формуле

$$R_x = R_o \left(\frac{U_o}{U} - 1 \right).$$

Зная геометрические размеры образца, можно подсчитать его удельное сопротивление по формуле

$$\rho = \frac{S}{l} \left(\frac{U_o}{U} - 1 \right) R_o,$$

где S — площадь электродов, мм^2 ;

l — толщина образца, см .

В качестве постоянного сопротивления R_o могут быть использованы высокоомные сопротивления типа КЛМ, имеющие номинальное значение сопротивления $(10^7 - 10^{12}) \text{ ом}$.

Входная электрометрическая лампа электронно-лампового вольтметра должна обладать сеточным током порядка 10^{-15} а, что может быть получено применением сдвоенного электрометрического тетрода типа 2Э2П. Чувствительность по току такого рода лампового электрометра не менее 10^{-14} а.

Выбором параметров схемы и применением высокочувствительного лампового электрометра, при выгодных геометрических размерах испытуемого образца, обеспечивается измерение удельных сопротивлений изоляции требуемого порядка ($10^{17} — 10^{18}$) ом · см.

Описываемый метод был проверен экспериментально. В качестве электронно-лампового вольтметра в схеме измерения был использован электрометрический усилитель ЭМУ-2, разработанный в Институте радиовещательного приема и акустики (ИРПА). Прибор дает возможность измерять напряжение (и ток) в высокоомных цепях в диапазоне от 0,01 до 100 в с погрешностью $\pm 2\%$. Постоянная времени прибора — 4 сек.

По схеме прибор представляет собой трехкаскадный усилитель постоянного тока с электрометрическим входным каскадом, охваченный 100% обратной связью. Использование обратной связи дает выигрыш в уменьшении постоянной времени и улучшении линейности амплитудной характеристики прибора. Для наилучшей стабильности в работе две ступени усилителя собраны по схеме катодно-связанного каскада, по две лампы в каскаде.

Схема электрометрического каскада с применением сдвоенного тетрода 2Э2П дана на рис. 2. Сопротивление утечки сетки электрометрического каскада R_g используется как постоянное сопротивление R_0 в потенциометрической схеме (рис. 1) и имеет величину порядка 10^{12} ом.

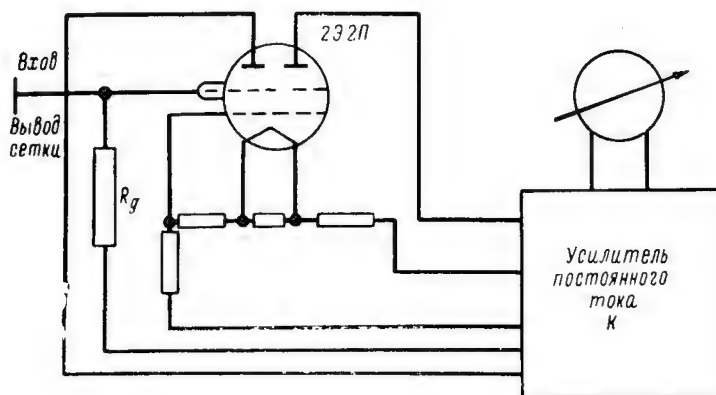


Рис. 2. Схема электрометрического каскада

Для подключения в схему испытуемого образца была сконструирована специальная камера с электродами (рис. 3). Дно камеры 1 снабжается резьбой для соединения с корпусом 2 выносного электрометрического каскада усилителя. Корпус 3 и дно камеры изготовлены из мягкого железа и служат защитным экраном от внешних полей. Электроды 4 и 5, в виде кругов, изготовлены из латуни в соответствии с размерами образца ($\varnothing 45$ мм). Пластина из испытуемого материала зажимается между электродами. Нижний электрод укреплен непосредственно на «выводе» сетки электрометрического тетрода (рис. 2).

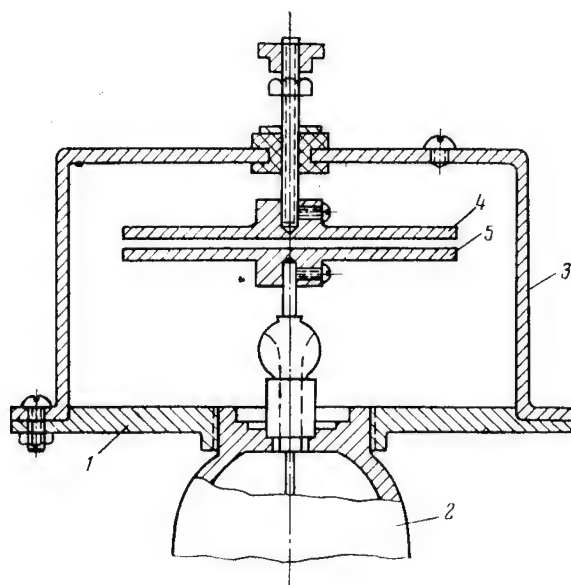


Рис. 3. Специальная камера

Для лучшего электрического контакта между испытуемым материалом и электродами применялось покрытие поверхности изоляционного материала аквадагом.

С помощью описываемой установки производилось измерение удельных сопротивлений ряда изоляционных материалов: полиэтилена, полистирола, высококачественной резины. Экспериментальная проверка метода производилась в Электроизмерительной лаборатории ЛЭТИ и на заводе «Севкабель», и показала возможность применения его для измерения удельных сопротивлений порядка ($10^{17} - 10^{18}$) $\text{ом} \cdot \text{см}$.

Установка проста в обращении и вполне может быть приспособлена для эксплуатации в заводских условиях.

На точность измерения высокоомных удельных сопротивлений изоляции по схеме с использованием лампового электрометра влияют такие факторы как стабильность электрометрического усилителя, приближенность величины тока сквозной проводимости, влияние поверхностных токов, а также класс точности измерительных приборов (вольтметров).

При условии отвода поверхностных токов (применение охранного кольца), учитывая влияние вышеперечисленных факторов, точность измерения удельных сопротивлений изоляции порядка $(10^{17} — 10^{18}) \text{ ом} \cdot \text{см}$ может быть оценена в 10 — 20 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Белорусов и И. И. Гроднев, Радиочастотные кабели, Госэнергоиздат, 1951.
2. А. М. Бонч-Бруевич, Применение электронных ламп в современной физике, Гостехиздат, 1954.
3. Е. Н. Гошицкая и И. В. Мейзеров, Электрометрический усилитель типа ЭМУ-2 и ЭМУ-2П, ИРПА, Труды, вып. V, 1956.

Поступила 7/V 1956 г.

Канд. техн. наук А. С. ВАСИЛЬЕВ

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПИ ИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В статье излагается метод расчета переходного процесса в цепи ионного преобразователя, который может быть распространен на любую цепь с периодически действующими коммутирующими устройствами, а также данные экспериментов и расчетов, относящихся как к переходным, так и стационарным режимам.

Данная работа выполнена в связи с разработкой преобразователя, используемого в качестве генератора тока повышенной частоты для установок индукционного нагрева.

Принцип действия параллельного ионного преобразователя достаточно подробно освещен в литературе [1, 2]. Известно, что параллельный ионный преобразователь (рис. 1) можно представить в виде эквивалентной схемы, если пренебречь потерями холостого хода и рассеянием анодного трансформатора, потерями в дросселе и вентилеях.

Для каждого полупериода между двумя последовательными коммутациями уравнение напряжений запишется в виде

$$L \frac{di_L}{dt} + i_r r = E, \quad (1)$$

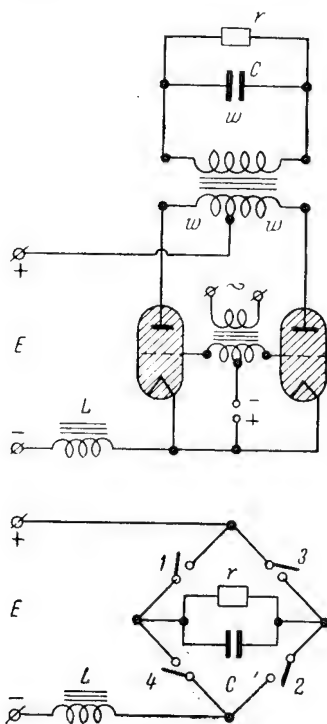


Рис. 1. Принципиальная и эквивалентная схемы ионного преобразователя

где i_L — ток через дроссель;
 i_r — ток через активное сопротивление,
 так как

$$i_L = i_r + i_c = i_r + rC \frac{di_r}{dt}, \quad (2)$$

$$\frac{d^2 i_r}{dt^2} + \frac{1}{rC} \frac{di_r}{dt} + \frac{1}{LC} i_r = \frac{E}{rLC}. \quad (3)$$

Установившийся ток

$$I = \frac{E}{r}.$$

Расчет удобнее вести в относительных значениях токов и напряжений:

$$i' = \frac{i}{I} = \frac{i}{E} r; \quad U' = \frac{U}{E}. \quad (4)$$

Тогда окончательно

$$\frac{d^2 i_r'}{dt^2} + \frac{1}{rC} \frac{di_r'}{dt} + \frac{1}{LC} i_r' = \frac{1}{LC}; \quad (5)$$

$$i_r = \frac{U_r}{E} = \frac{U_c}{E} = U_c'.$$

Начальные условия определяются следующими положениями:

а) ток через сопротивление изменяется по периодической кривой; следовательно, при выборе начала координат в середине полупериода получим

$$-i'_r + \frac{T}{4} = i'_r - \frac{T}{4}; \quad (6)$$

б) ток в дросселе сохраняет свое направление неизменным, т. е.

$$i'_L + \frac{T}{4} = i'_L - \frac{T}{4}. \quad (7)$$

Решение такого уравнения дает три вида режимов:

1) аперидический режим

$$v^2 = 1 - 4r^2 \frac{C}{L} > 0; \quad (8)$$

2) граничный режим

$$v^2 = 1 - 4r^2 \frac{C}{L} = 0; \quad (9)$$

3) колебательный режим

$$v^2 = 1 - 4r^2 \frac{C}{L} < 0. \quad (10)$$

(Колебательный режим может существовать при различных значениях отношения частоты собственных колебаний f_0 к частоте вынужденных колебаний f ($n = \frac{f}{f_0}$)).

На рис. 2 и 3 приведены внешние характеристики нонного преобразователя в стационарном режиме (максимальное обратное напряжение на вентиле и время, в течение которого вентиль на-

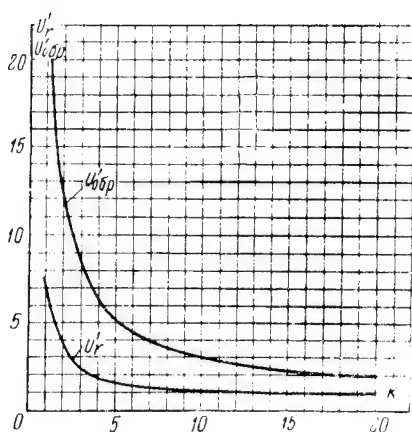


Рис. 2. Внешние характеристики инвертора

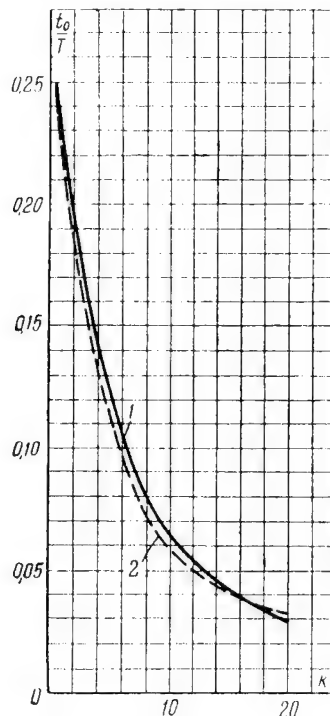


Рис. 3. Зависимость времени запирания от параметра $k = \frac{1}{frc}$ для апериодического (1) и колебательного (2) режимов

ходится под отрицательным напряжением, в дальнейшем называемое «временем запирания» t_0).

Время запираания вычисляется следующим образом. Неработающий вентиль всегда находится под напряжением анодного трансформатора (напряжением на нагрузке). Следовательно, момент перехода этого напряжения через нуль определяет время запираания, в течение которого вентиль находился под отрицательным напряжением (рис. 3).

На рис. 3, и в дальнейшем, время запираания дается в долях периода преобразованного напряжения, а все напряжения — в долях напряжения источника питания инвертора, в зависимости от параметра $k = \frac{1}{frC}$.

Вычисление t_0 производится графическим решением уравнения

$$i_r'(t) = i_r'(t_0) = 0.$$

Для работы преобразователя при значительной частоте необходимо выбрать такой режим, при котором время запираания было бы большим (так как за это время сетка в вентиле должна восстановить свои управляющие свойства) — для этого необходимо работать при малых значениях параметра k ; с другой стороны, обратное напряжение в схеме не должно превышать допустимого обратного напряжения на вентиле — для этого необходимо работать при больших значениях параметра k . Эти противоречия в преобразователях большой мощности при повышенной частоте приводят к узкой области изменений параметра k (примерно 4—7).

При работе ионного преобразователя в качестве генератора тока повышенной частоты для индукционного нагрева необходимы частые включения и отключения установки в связи с кратковременностью нагрева, особенно при нагреве под закалку и пайку. Поэтому вопрос об устойчивости и надежности пуска преобразователя приобретает исключительную важность. Эксперименты показали, что многие режимы, вполне устойчивые в условиях стационарной работы, не могут быть воспроизведены при непосредственном включении. Особенно это относится к колебательным режимам работы инвертора.

При исследовании установившегося режима решение дифференциального уравнения, справедливое только для отрезка времени между двумя последовательными переключениями, дает значения токов и напряжений фактически для любого момента времени ввиду периодичности процесса. Такой метод решения непригоден при исследовании переходного режима во время пуска, вследствие постепенного роста токов и напряжений на элементах схемы. Задача может быть решена постепенным переходом от предыдущего полупериода к последующему, но такое решение является чрезвычайно трудоемким и во многих случаях не дает возможности выразить аналитически значения напряжений и токов для любого полупериода.

Для решения переходного процесса в нашем случае были использованы уравнения в конечных разностях, что позволило создать общие формулы как для переходного, так и для стационарного режимов и вычислить изменение обратного напряжения и времени запираания во время пуска.

Как правило, в первые полупериоды после включения время записания меньше, чем в установившемся режиме. Степень уменьшения времени записания зависит от параметров схемы и, в основном, определяет возможность надежного пуска мощного преобразователя, так как при пуске время записания легко может оказаться меньше времени деионизации вентиля, что приведет к короткому замыканию цепи.

Метод исследования переходного процесса заключается в следующем.

Рассматривается какой-нибудь полупериод после включения, допустим $h+1$. Так как в схеме имеются емкость и индуктивность, то при мгновенной коммутации ток через дроссель в начале полупериода $h+1$ равен току в нем в конце полупериода h ; то же самое можно сказать и об абсолютной величине напряжения на конденсаторе. Решение дифференциального уравнения для $h+1$ полупериода дает возможность получить формулы, алгебраически связывающие значения токов и напряжений в начале и конце $h+1$ полупериода или, иначе говоря, в конце полупериода $h+1$ и в конце полупериода h .

Полученные уравнения можно рассматривать, как уравнения в конечных разностях, решение которых дает возможность определить ток и напряжение на элементах схемы в начале любого полупериода. Значения токов и напряжений внутри данного полупериода легко определяются из решения уравнения (5).

Для примера рассмотрим случай колебательного режима. Общее выражение для тока в колебательном режиме

$$i_r' = Be^{-\frac{t}{2rC}} \sin(\omega_0 t + \varphi); \quad \left(\text{при } n = \frac{f_0}{f} = 1 \right). \quad (11)$$

Рассмотрим $h+1$ полупериод (отсчет времени ведем от начала каждого полупериода). Поскольку напряжение на конденсаторе в начале $h+1$ полупериода равно по абсолютной величине напряжению в конце полупериода h , можно написать

$$i'_{r_{h+1}} = B \sin \varphi + 1 = -i'_{r_h}; \quad t = 0. \quad (12)$$

Знак минус показывает, что после коммутации полярность напряжения на конденсаторе по отношению к напряжению источника питания изменилась на обратную.

Из (11)

$$B = -\frac{1 + i'_{r_h}}{\sin \varphi}. \quad (13)$$

Принимая во внимание, что $n = 1$, т. е. $2\pi f = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T}$,
 где T — период задающих колебаний, получим для момента
 $t = \frac{T}{2}$

$$i'_{r_{h+1}} = Be^{-\frac{T}{4rC}} \sin(\pi + \varphi) + 1 = (1 + i'_{r_h})e^{-\frac{k}{4}} + 1. \quad (14)$$

Теперь остается решить уравнение в конечных разностях

$$\left. \begin{aligned} i'_{r_{h+1}} &= (1 + i'_{r_h})e^{-\frac{k}{4}} + 1; \\ i'_{r_{h+1}} - e^{-\frac{k}{4}} i'_{r_h} &= 1 + e^{-\frac{k}{4}}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Решение такого уравнения [3]

$$i'_{r_h} = AS^h + C', \quad (16)$$

где S — корень характеристического уравнения

$$S - e^{-\frac{k}{4}} = 0 \quad S = e^{-\frac{k}{4}}. \quad (17)$$

При $h = 0$

$$i'_{r_h} = 0 \quad \text{и} \quad A = -C', \quad (18)$$

поэтому окончательно

$$i'_{r_h} = A(e^{-\frac{k}{4}h} - 1); \quad (19)$$

подставляя (18) в (14) находим

$$A = \frac{1 + e^{-\frac{k}{4}}}{e^{-\frac{k}{4}} - 1}; \quad (20)$$

$$i'_{r_h} = \frac{(1 + e^{-\frac{k}{4}})(1 - e^{-\frac{k}{4}h})}{1 - e^{-\frac{k}{4}}}; \quad (21)$$

при $h \rightarrow \infty$

$$i'_{r_h} \rightarrow i'_{r_0} = \frac{(1 + e^{-\frac{k}{4}})}{(1 - e^{-\frac{k}{4}})}, \quad (22)$$

что соответствует установившемуся режиму.

Точно так же можно определить ток через дроссель. Общее выражение для него, согласно (5) и (2),

$$i'_h = rC \frac{di'_r}{dt} + i'_r = \frac{2\pi}{k} B e^{-\frac{t}{2rC}} \cos(\omega_0 t + \varphi) + \\ + \frac{B}{2} e^{-\frac{t}{2rC}} \sin(\omega_0 t + \varphi) + 1. \quad (23)$$

Для $h+1$ полупериода при $t=0$

$$i'_{L_{h+1}} = i'_{L_h},$$

учитывая (12) и (22)

$$i'_{L_{h+1}} = \frac{2\pi}{k} B \cos \varphi + \frac{B}{2} \sin \varphi + 1 = \frac{2\pi}{k} \operatorname{ctg}(1 + i'_{r_h}) = \\ = \frac{(1 + i'_{r_h})}{2} + 1 = i'_{L_h}. \quad (24)$$

Отсюда

$$\operatorname{ctg} \varphi = \frac{(1 + i'_{r_h} - 2i'_{L_h})k}{4\pi(1 + i'_{r_h})}. \quad (25)$$

При $t = \frac{T}{2}$

$$i'_{L_{h+1}} = \frac{2\pi}{k} B e^{-\frac{k}{4}} \cos(\pi + \varphi) + \frac{B}{2} e^{-\frac{k}{4}} \sin(\pi + \varphi) + 1 = \\ = 1 - e^{-\frac{k}{4}} - i'_{L_h} e^{-\frac{k}{4}}. \quad (26)$$

Принимая во внимание (12) и (24)

$$i'_{L_{h+1}} = \frac{(1 - 2i'_{r_h} - i'_{L_h})}{2} e^{-\frac{k}{4}} + \frac{(1 + i'_{r_h})}{2} e^{-\frac{k}{4}} + 1 = \\ = 1 - e^{-\frac{k}{4}} - i'_{L_h} e^{-\frac{k}{4}}. \quad (27)$$

Решение этого уравнения аналогично (14)

$$i'_{Lh} = \frac{\left(1 + e^{-\frac{k}{4}}\right) \left(1 - e^{-\frac{k}{4}(h)}\right)}{1 - 2e^{-\frac{k}{4}(h+1)} + e^{-\frac{k}{4}}}. \quad (28)$$

Время запираания для любого полупериода находится графическим решением уравнения

$$i'_r = Be^{-\frac{t_0}{2rC}} \sin(\omega_0 t_0 + \varphi) + 1 = 0, \quad (29)$$

где B и φ суть постоянные, определяемые для каждого полупериода по (12) и (24), а момент $\frac{t_0}{T}$ соответствует условию

$$i'_r(t) = 0$$

и определит время запираания.

Точно так же можно провести анализ для апериодического режима. Задача в этих случаях несколько усложняется, так как приходится иметь дело с решением системы уравнений в конечных разностях.

При апериодическом режиме получаются следующие окончательные формулы.

Для любого полупериода h

$$i'_r = A'_1 e^{p_1 t} + A'_2 e^{p_2 t} + 1; \quad (30)$$

$$i'_L = RC(p_1 A'_1 e^{p_1 t} + p_2 A'_2 e^{p_2 t}) + i'_r, \quad (31)$$

где

$$A'_1 = \frac{i'_r h - v + 2i'_L h - 1 - i'_r v}{2ve \left(-p_1 \frac{T}{4} \right)};$$

$$A'_2 = \frac{1 - i'_r h - i'_r v - v - 2i'_L h}{2ve \left(-p_2 \frac{T}{4} \right)};$$

$$p_{1,2} = -\frac{1 + v}{2rC};$$

$$i'_{r_h} = \frac{-i'_{r_0}b + ci'_{L_0} - i'_{r_0}S_2}{S_2 - S_1} S_1^h + \frac{i'_{r_0}(S_1 + B) - ci'_{L_0}}{S_2 - S_1} S_2^h + i'_{r_0}; \quad (32)$$

$$i'_{L_h} = \frac{-i'_{r_0}b + ci'_{L_0} - i'_{r_0}S_2}{S_2 - S_1} \cdot \frac{S_1 + b}{c} S_1^h + \\ + \frac{i'_{r_0}(S_1 + b) - ci'_{L_0}}{S_2 - S_1} \cdot \frac{S_2 + b}{c} S_2^h + i'_{L_0}; \quad (33)$$

$$b = e^{-\frac{k}{4}} \left(\operatorname{ch} v \frac{k}{4} - \frac{\operatorname{sh} v \frac{k}{4}}{v} \right);$$

$$c = \frac{2}{v} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} e^{-\frac{k}{4}};$$

$$S_{1,2} = \frac{e^{-\frac{k}{4}}}{v} \left(\operatorname{sh} v \frac{k}{4} \pm \sqrt{\operatorname{sh}^2 v \frac{k}{4} + v^2} \right).$$

Параметр v определяется из (7) и характеризует, насколько далеко отстоит апериодический режим от граничного. Так как в апериодическом режиме

$$1 > v > 0, \text{ то } -1 < S_{1,2} < +1$$

и значения токов i'_{r_0} и i'_{L_0} при установившемся режиме

$$i'_{r_0} = \frac{1 - 2e^{-\frac{k}{4}} \operatorname{ch} v \frac{k}{4} - e^{-2\frac{k}{4}}}{1 - \frac{2}{v} e^{-\frac{k}{4}} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} - e^{-2\frac{k}{4}}}; \quad (34)$$

$$i'_{L_0} = \frac{1 - ve^{-\frac{k}{4}} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} - e^{-\frac{k}{4}} \frac{\operatorname{sh} v \frac{k}{4}}{v} - e^{-2\frac{k}{4}}}{1 - \frac{2}{v} e^{-\frac{k}{4}} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} - e^{-2\frac{k}{4}}}. \quad (35)$$

Значение времени запираания в любой полупериод вычисляется аналогично (28) путем графического решения уравнения

$$i'_2 = A'_1 e^{p_1 t} + A'_2 e^{p_2 t} + 1 = 0. \quad (36)$$

В табл. 1 на рис. 4 приведены изменения времени записания и обратного напряжения в аperiodическом и колебательном режимах.

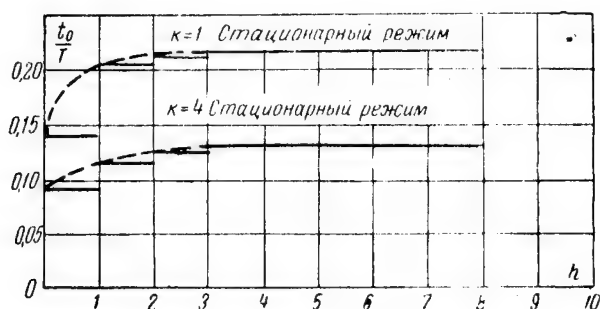


Рис. 4. Значение времени записания в переходном режиме для $k = 1$ и $k = 4$ при колебательном режиме работы инвертора
(По оси абсцисс отложен номер полупериода после пуска)

Таблица 1

$k = \frac{1}{frc}$	1			5		
v	0,96	0,60	0,30	0,96	0,60	0,30
$\frac{t_0}{T}$ при $h = 1$	0,220	0,215	0,210	0,121	0,119	0,115
$\frac{t_0}{T}$ в стационарном режиме	0,220	0,220	0,220	0,125	0,125	0,125

Из приведенного анализа можно сделать следующие выводы.

Самым легким режимом в отношении надежного пуска является аperiodический режим. При этом в начале процесса почти не происходит уменьшения времени записания. Кроме того, в первые полупериоды ток через вентиль мал по своей величине по сравнению со стационарным режимом, что приводит к уменьшению времени деионизации самих вентилях [1]. Работать необходимо при значениях $v = 0,1 - 0,45$.

Дальнейшее увеличение параметра v вызывает, с одной стороны увеличение габаритов дросселя, а с другой — делает невозможным применение самовозбуждения. Последнее вызвано медленным возрастанием напряжений на элементах схемы и, следо-

вательно, сеточного напряжения, которое становится недостаточным для четкого зажигания вентиля. (Как показывают эксперименты, работа с самовозбуждением может быть надежна при значении параметра $\nu \leq 0,25$).

В колебательном режиме происходит быстрое нарастание токов и напряжений в схеме; в то же время довольно резко уменьшается время записания (на 35—40% при малых k и на 25—30% при больших). Такое уменьшение времени записания в первые полупериоды происходит при значительной величине тока через вентиль. Сочетание этих факторов приводит к срыву режима.

Для работы мощных ионных преобразователей на повышенных частотах колебательный режим является непригодным.

Анализ был проведен при работе инвертора на активное сопротивление. Однако, как показали эксперименты, можно, с достаточной точностью, данный анализ применить и в случае нагрузки в виде колебательного контура. При этом следует вместо величины активного сопротивления в формулы подставлять величину эквивалентного сопротивления контура, настроенного в резонанс на рабочую частоту инвертора. В этом случае конденсаторная батарея инвертора может быть формально разбита на коммутирующую и компенсирующую индуктивности контура [4].

ПРИЛОЖЕНИЕ

Анализ переходного процесса в аperiodическом режиме

Рассмотрим какой-то полупериод h . Предположим, что к концу полупериода напряжение на конденсаторе достигнет значения $u'_{ch} = i'_{ch}$, а ток в дросселе будет равен i'_{Lh} . После переключения ($h+1$ полупериод) напряжение на конденсаторе оказывается включенным навстречу по отношению к напряжению источника питания. Ток в дросселе сохранит свою величину. Таким образом, мы можем сказать, что в начале $h+1$ полупериода ($t = -\frac{T}{4}$) напряжение на конденсаторе

$$u'_{ch} = i'_{ch}, \quad (37)$$

(начало отсчета ведем от середины полупериода). Ток в дросселе в начале $h+1$ полупериода

$$i'_{Lh} = i'_{Lh}, \quad (38)$$

Найдем теперь значения i'_{L_h} и i'_{r_h} в конце $h+1$ полупериода; согласно (29) и (30) при $t = -\frac{T}{4}$

$$i'_{r_h - \frac{T}{4}} = A'_1 e^{-p_1 \frac{T}{4}} + A'_2 e^{-p_2 \frac{T}{4}} + 1 = -i'_{r_h}; \quad (39)$$

$$i'_{L_h - \frac{T}{4}} = rC \left[-\left(\frac{1-v}{2rC}\right) A'_1 e^{-p_1 \frac{T}{4}} - \left(\frac{1+v}{2rC}\right) A'_2 e^{-p_2 \frac{T}{4}} \right] + i'_{r_h - \frac{T}{4}} = i'_{L_h}. \quad (40)$$

Так как

$$p_{1,2} = -\frac{1 \mp v}{2rC}, \quad (41)$$

из формулы (38) следует

$$A'_1 = -\frac{i'_{r_h} + A'_2 e^{-p_2 \frac{T}{4}} + 1}{e^{-p_2 \frac{T}{4}}}. \quad (42)$$

Подставляя значение A_1 в (39), получаем

$$A'_2 = \frac{1 - i'_{r_h} - i'_{r_h} v - v - 2i'_{L_h}}{2ve^{-p_2 \frac{T}{4}}}, \quad (43)$$

откуда

$$A'_1 = \frac{i'_{r_h} - v + 2i'_{L_h} - 1 - i'_{r_h} v}{2ve^{-p_1 \frac{T}{4}}}. \quad (44)$$

Таким образом, при $t = -\frac{T}{4}$

$$i'_{r_h - \frac{T}{4}} = \frac{i'_{r_h} - v + 2i'_{L_h} - 1 - i'_{r_h} v}{2ve^{-p_1 \frac{T}{4}}} e^{p_1 \frac{T}{4}} + \frac{1 - i'_{r_h} - i'_{r_h} v - v - 2i'_{L_h}}{2ve^{-p_2 \frac{T}{4}}} e^{p_2 \frac{T}{4}} + 1. \quad (45)$$

Принимая во внимание (40)

$$i'_{r \frac{T}{4}} = 1 + e^{-\frac{T}{4rC}} \left(\frac{i'_{r_h} - v + 2i'_{L_h} - 1 - i'_{r_h}v}{2v} e^{\frac{v}{4rC}} + \right. \\ \left. + \frac{1 - i'_{r_h} - i'_{r_h}v - v - 2i'_{L_h}}{2v} e^{-\frac{v}{4rC}} \right), \quad (46)$$

где $\frac{T}{rC} = k$;

$$i'_{r \frac{T}{4}} = 1 + e^{-\frac{k}{4}} \left(\frac{i'_{r_h}}{2v} e^{\frac{v}{4}} - \frac{1}{2} e^{\frac{v}{4}} + \frac{i'_{L_h}}{v} e^{\frac{v}{4}} - \right. \\ \left. - \frac{1}{2v} e^{\frac{v}{4}} - \frac{i'_{r_h}}{2} e^{\frac{v}{4}} + \frac{1}{2v} e^{-\frac{v}{4}} - \frac{i'_{r_h}}{2v} e^{-\frac{v}{4}} - \right. \\ \left. - \frac{i'_{r_h}}{2} e^{\frac{v}{4}} - \frac{1}{2} e^{-\frac{v}{4}} - \frac{i'_{L_h}}{v} e^{-\frac{v}{4}} \right); \quad (47)$$

$$i'_{L \frac{T}{4}} = 1 - e^{-\frac{k}{4}} \left[\left(\operatorname{ch} v \frac{k}{4} + \frac{1}{v} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} \right) + i'_{r_h} \left(\operatorname{ch} v \frac{k}{4} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{\operatorname{sh} v \frac{k}{4}}{v} \right) - 2 \frac{i'_{L_h}}{v} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} \right]; \\ i'_{L \frac{T}{4}} = \left[\frac{i'_{r_h} - v + 2i'_{L_h} - 1 - i'_{r_h}v}{2ve} \left(\frac{1-v}{2} \right) e^{p_1 \frac{T}{4}} - \right. \\ \left. - \frac{1 - i'_{r_h}v - v - 2i'_{L_h}}{2ve} \left(\frac{1+v}{2} \right) e^{p_2 \frac{T}{4}} \right] + i'_{r \frac{T}{4}} = \\ = 1 + e^{-\frac{k}{4}} \left[i'_{r_h} \left(\frac{\operatorname{sh} v \frac{k}{4}}{2v} - \frac{v}{2} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} \right) + i'_{L_h} \left(-\frac{\operatorname{sh} v \frac{k}{4}}{v} + \operatorname{ch} v \frac{k}{4} \right) - \right. \\ \left. - \left(\frac{1}{2v} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} + \frac{v}{2} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} + \operatorname{ch} v \frac{k}{4} \right) \right]. \quad (48)$$

Мы получили уравнения, связывающие значения i'_{r_h} и i'_{L_h} в конце h полупериода с их значениями в конце $(h+1)$ полупериода.

да, иначе говоря, мы получили систему уравнений в конечных разностях. Решив эту систему, найдем изменения токов и напряжений в схеме в любой полупериод.

Окончательно мы получаем следующую систему уравнений в конечных разностях

$$i'_{r_{h+1}} = 1 - bi'_{r_h} + ci'_{L_h} - a; \quad (49)$$

$$i'_{L_{h+1}} = 1 - d + ai'_{L_h} + ei'_{r_h}, \quad (50)$$

где

$$\begin{aligned} a &= e^{-\frac{k}{4}} \left(\frac{\operatorname{sh} v \frac{k}{4}}{v} + \operatorname{ch} v \frac{k}{4} \right); \\ b &= e^{-\frac{k}{4}} \left(\operatorname{ch} v \frac{k}{4} - \frac{\operatorname{sh} v \frac{k}{4}}{v} \right); \\ c &= \frac{2}{v} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} e^{-\frac{k}{4}}; \\ d &= \left(\frac{1}{2v} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} + \frac{v}{2} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} + \operatorname{ch} v \frac{k}{4} \right) e^{-\frac{k}{4}}; \\ e &= e^{-\frac{k}{4}} \left(\frac{\operatorname{sh} v \frac{k}{4}}{2v} - \frac{v}{2} \operatorname{sh} v \frac{k}{4} \right); \end{aligned} \quad (51)$$

обозначим

$$1 - a = A; \quad 1 - d = B, \quad (52)$$

тогда

$$\begin{aligned} i'_{r_{h+1}} &= A - bi'_{r_h} + ci'_{L_h}; \\ i'_{L_{h+1}} &= B + ai'_{L_h} + ei'_{r_h}. \end{aligned} \quad (53)$$

Известно, что решение системы неоднородных уравнений будет состоять из суммы общего и частного решений. Общее решение системы

$$i'_{r_{(h+1)}} = -bi'_{r_h} + ci'_{L_h}; \quad (54)$$

$$i'_{L_{(h+1)}} = ai'_{L_h} + ei'_{r_h} \quad (55)$$

будем искать в виде

$$i'_{r_h} = A_1 S^h; \quad (56)$$

$$i'_{L_h} = A_2 S^h. \quad (57)$$

Подставляя эти выражения для i'_{rh} и i'_{l_h} в заданную систему, получаем следующую систему однородных уравнений

$$A_1 S^{h+1} = -bA_1 S^h + cA_2 S^h; \quad (58)$$

$$A_2 S^{h+1} = aA_2 S^h + eA_1 S^h; \quad (59)$$

$$A_1 S + bA_1 - cA_2 = 0; \quad (60)$$

$$A_2 S - aA_2 - eA_1 = 0; \quad (61)$$

из условий совместимости системы

$$\begin{vmatrix} (S + b); & -c \\ -e; & (S - a) \end{vmatrix} = 0, \quad (62)$$

откуда

$$(S + b)(S - a) - ec = 0;$$

$$S_{1,2} = \frac{a+b}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2 + 2ab + b^2 - 4ec}{4}}; \quad (63)$$

учитывая, что

$$\begin{aligned} \frac{a-b}{2} &= \frac{e}{v} \operatorname{sh} v \frac{k}{2}, \\ a^2 &= e^{-2\frac{k}{4}} \left(\frac{\operatorname{sh}^2 v \frac{k}{4}}{v^2} + \frac{2 \operatorname{sh} v \frac{k}{4} \operatorname{ch} v \frac{k}{4}}{v} + \operatorname{ch}^2 v \frac{k}{4} \right); \\ 2ab &= 2e^{-2\frac{k}{4}} \left(\operatorname{ch}^2 v \frac{k}{4} - \frac{\operatorname{sh}^2 v \frac{k}{4}}{v^2} \right); \\ b^2 &= e^{-2\frac{k}{4}} \left(\operatorname{ch}^2 v \frac{k}{4} - \frac{2 \operatorname{sh} v \frac{k}{4} \operatorname{ch} v \frac{k}{4}}{v} + \frac{\operatorname{sh}^2 v \frac{k}{4}}{v^2} \right); \\ 4ec &= 4e^{-2\frac{k}{4}} \left(\frac{\operatorname{sh}^2 v \frac{k}{4}}{v^2} - \operatorname{sh}^2 v \frac{k}{4} \right). \end{aligned}$$

Подкоренное выражение в (62) равно

$$\begin{aligned} \frac{a^2 + 2ab + b^2 - 4ec}{4} &= \frac{e^{-2\frac{k}{4}}}{v^2} \left(\operatorname{sh}^2 v \frac{k}{4} + v^2 \right); \\ S_{1,2} &= \frac{e^{-\frac{k}{4}}}{v} \left(\operatorname{sh} v \frac{k}{4} \pm \sqrt{\operatorname{sh}^2 v \frac{k}{4} + v^2} \right). \quad (64) \end{aligned}$$

Найдем коэффициенты A_1 и A_2 при S_1 и S_2 , обозначив коэффициенты при S_1 через A_{11} и A_{21} , а при S_2 через A_{12} и A_{22} . Обращаясь к системе уравнений (59, 60), получаем:

$$\begin{aligned} A_{11}(S_1 + b) - cA_{21} &= 0; \\ -A_{11}e + (S_1 - a)A_{21} &= 0. \end{aligned} \quad (65)$$

Ввиду того, что определитель, составленный из коэффициентов при A_{11} и A_{21} этой системы, согласно (62) равен нулю, система имеет решение, отличное от нулевого

$$A_{11} = 1; \quad (66)$$

$$A_{21} = \frac{S_1 + b}{c} = \frac{e}{S_1 - a}; \quad (67)$$

$$A_{12} = 1; \quad (68)$$

$$A_{22} = \frac{S_2 + b}{c} = \frac{e}{S_2 - a}. \quad (69)$$

Общее решение найдется в виде

$$i'_{r_h} = c_1 A_{11} S_1^h + c_2 A_{12} S_2^h + i'_{r_0}; \quad (70)$$

$$i'_{L_h} = c_1 A_{21} S_1^h + c_2 A_{22} S_2^h + i'_{L_0}, \quad (71)$$

где i'_{L_0} — значение тока в момент коммутации в установившемся режиме;

i'_{r_0} — значение напряжения на нагрузке в момент коммутации в установившемся режиме.

Для определения коэффициентов c_1 и c_2 воспользуемся начальными условиями: при $h=0$

$$i'_{L_h} = 0; \quad (72)$$

$$i'_{r_h} = 0. \quad (73)$$

Следовательно,

$$c_1 + c_2 + i'_{r_0} = 0;$$

$$c_1 \frac{S_1 + b}{c} + c_2 \frac{S_2 + b}{c} + i'_{L_0} = 0; \quad (74)$$

из (72)

$$c_1 = \frac{ci'_{L_0} - i'_{r_0}b - i'_{r_0}S_2}{S_2 - S_1}; \quad (75)$$

$$c_2 = \frac{i'_{r_0}S_1 + i'_{r_0}b - ci'_{L_0}}{S_2 - S_1}. \quad (76)$$

Таким образом,

$$i_{r_h} = \frac{-i'_{r_0}b + ci'_{L_0} - i'_{r_0}S_2}{S_2 - S_1} S_1^h + \frac{i'_{r_0}(S_1 + b) - ci'_{L_0}}{S_2 - S_1} S_2^h + i'_{r_0}; \quad (77)$$

$$i'_{L_h} = \frac{-i'_{r_0}b + ci'_{L_0} - i'_{r_0}S_2}{S_2 - S_1} \cdot \frac{S_1 + b}{c} S_1^h + \\ + \frac{[i'_{r_0}(S_1 + b) - ci'_{L_0}]}{S_2 - S_1} \cdot \frac{(S_2 + b)}{c} S_2^h + i'_{L_0}. \quad (78)$$

Частное решение системы уравнений в конечных разностях (48, 49) в нашем случае должно равняться постоянному числу. Следовательно,

$$i'_{r_0} = 1 - a - bi'_{r_0} + ci'_{L_0}; \\ i'_{L_0} = 1 - d + ai'_{L_0} + ei'_{r_0}. \quad (79)$$

Отсюда

$$i'_{r_0} = \frac{(1-a)(1-a) + c(1-d)}{(1+b)(1-a) - ec}; \quad (80)$$

$$i'_{L_0} = \frac{(1+b)(1-d) + e(1-a)}{(1+b)(1-a) - ec}. \quad (81)$$

Проанализируем выражения для a, b, c, d, e .

$$S = \frac{e^{-\frac{k}{4}}}{v} \left(\operatorname{sh} v \frac{k}{4} + \sqrt{\operatorname{sh}^2 v \frac{k}{4} + v^2} \right);$$

так как $1 - v > 0$, то крайними случаями будут:

$$v \rightarrow 1 (k \rightarrow 0; k \rightarrow \infty) \quad v \rightarrow 0 (k \rightarrow 0; k \rightarrow \infty)$$

$$1) \text{ при } v \rightarrow 1 \text{ и } k \rightarrow \infty, S_{12} \rightarrow e^{-\frac{k}{4}} \left(\frac{e^{-\frac{k}{4}}}{2} + \sqrt{\frac{e^{-\frac{k}{2}}}{4} + 1} \right),$$

$$k \rightarrow \infty S_1 \rightarrow 1, S_2 \rightarrow 0;$$

$$2) \text{ при } v \rightarrow 1, k \rightarrow 0, S_{12} \rightarrow 0;$$

$$3) \text{ при } v \rightarrow 0, k \rightarrow \infty S_{12} \rightarrow 0;$$

$$4) \text{ при } v \rightarrow 0, k \rightarrow 0, S_{12} \rightarrow 1.$$

В любом случае можно сказать, что S_{12} принимает значение от -1 до $+1$. Ввиду этого с увеличением h первые два члена

в формулах для токов в дросселе (i'_{L_h}) и напряжения на конденсаторе (i'_{r_h}) исчезают, и остаются только члены i'_{r_0} и i'_{L_0} , которые дают величину i'_r и i'_L в стационарном режиме.

Вычисление времени запираания производится следующим образом.

Для h полупериода вычисляются i'_{r_h} и i'_{L_h} по формулам (75, 76). По известным i'_{r_h} и i'_{L_h} , вычисляются A_1 и A_2 (42, 43). Время, в течение которого вентиль находится под отрицательным напряжением, вычисляется графическим решением уравнения (29)

$$A_1 e^{p_1 t_0} + A_2 e^{p_2 t_0} + 1 = 0,$$

где $t_0 = \frac{f}{T}$ выражено в частях периода.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Шиллинг, Схемы выпрямителей, инверторов и преобразователей частоты, Госэнергоиздат, 1950.
2. W. Schilling, Arch. für Electrotechnik, v. 29, 1935.
3. Я. С. Безикович, Исчисление конечных разностей, Издательство ЛГУ, 1939.
4. А. Е. Слухоцкий, Применение ионных преобразователей для питания установок индукционного нагрева, Промышленное применение токов высокой частоты, Труды 1-ой Ленинградской конференции, Машгиз, 1952.

Поступила 10/IV 1957 г.

*Канд. техн. наук Ю. М. КАЗАРНИЦОВ
Канд. техн. наук С. В. ТОЛОКОНИНОВ
Канд. техн. наук Ю. А. КОЛОМЕНСКИЙ*

О ВЫБОРЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ВРЕМЕННОГО ДИСКРИМИНАТОРА

Введение

В ряде радиотехнических устройств нашли применение схемы временных дискриминаторов, предназначенные для получения сигнала ошибки, пропорционального временному положению сигнального импульса. Обычно, на вход временного дискриминатора поступает сигнальный видеопульс с детекторного каскада приемного устройства, а вырабатываемый сигнал ошибки используется либо для автоматического слежения за положением сигнального импульса, либо для визуальной индикации по шкале стрелочного прибора. При работе подобного рода устройств в условиях помех возникает случайная ошибка отсчета. Эту ошибку принято характеризовать среднеквадратичной величиной отклонения показаний шкалы устройства от ее истинного положения. Величина среднеквадратичной ошибки зависит от целого ряда факторов и, в частности, от полосы пропускания высокочастотного тракта приемника и некоторых параметров временного дискриминатора. Эти зависимости и являются предметом исследования настоящей работы.

Анализ проводится при следующих предположениях.

1. Сигнальный импульс имеет колокольную форму огибающей.
2. На вход приемного устройства одновременно с сигналом воздействует чисто флюктуационная помеха.

3. Резонансный усилитель, под которым подразумевается высокочастотный тракт приемника, имеет колокольную частотную и линейную фазовую характеристики. Резонансная частота усилителя равна несущей частоте сигнала.

4. Искажением формы и подавлением средней огибающей сигнального импульса в присутствии флюктуационной помехи можно пренебречь.

Первые три допущения не требуют пояснений, поэтому остановимся коротко лишь на последнем. Известно, что форма средней огибающей импульсного сигнала на выходе линейного безинерционного детектора определенным образом зависит от отношения «помеха/сигнал» на входе детектора. Изменение формы огибающей в присутствии помехи объясняется тем, что каждой точке огибающей сигнала соответствует определенное отношение «помеха/сигнал», а следовательно, и свой закон распределения амплитуд [1]. При этом, чем ниже уровень точки на огибающей, тем больше закон распределения отличается от нормального и, следовательно, тем больше среднее положение точки отличается от ее положения в отсутствии помехи. Наряду с искажением формы огибающей сигнала, помеха приводит к уменьшению средней амплитуды сигнального импульса, что принято называть подавлением сигнала помехой. С подавлением сигнала помехой, а также с искажением формы огибающей можно не считаться, если отношение «помеха/сигнал» в интересующих нас точках огибающей весьма мало. Последнее условие выполняется, например, при синхронном детектировании, когда величина синхронного напряжения во много раз превосходит сигнал и помеху.

1. Сигнал и помеха на выходе резонансного усилителя

Как известно [3], сигнальный импульс колокольной формы и единичной амплитуды может быть представлен выражением

$$u_c(t) = e^{-\alpha t^2} \cos \omega_0 t, \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{4 \ln d}{\pi^2}$ — параметр, характеризующий ширину спектра импульса на уровне $1/d$.

Спектральная плотность импульса может быть найдена с помощью преобразования Фурье

$$\begin{aligned} g(\omega) &= \int_{-\infty}^{+\infty} u_c(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha t^2} \cos \omega_0 t e^{-j\omega t} dt = \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha t^2} \cos(\omega - \omega_0) t dt + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha t^2} \cos(\omega + \omega_0) t dt. \end{aligned}$$

Вычислив интегралы [2], получим

$$g(\omega) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\alpha}} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} e^{-\frac{(\omega + \omega_0)^2}{4\alpha}}. \quad (2)$$

Из (2) видно, что спектральная плотность может быть представлена двумя кривыми, симметрично расположенными относительно оси $\omega = 0$. Учитывая это, (2) можно переписать так

$$g(\omega) = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\alpha}}.$$

В соответствии с третьим предположением, передаточная функция резонансного усилителя, при резонансном коэффициенте усиления равном единице, может быть представлена выражением

$$K(\omega) = e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\beta}},$$

где $\beta = \frac{4 \ln d}{\tau_0^2}$ — параметр, характеризующий полосу пропускания усилителя на уровне $1/d$;
 τ_0 — длительность резонансной системы.

Спектральная плотность импульса на выходе резонансной системы

$$g(\omega)K(\omega) = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\alpha}} e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\beta}} = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\gamma}},$$

где $\gamma = \frac{\alpha\beta}{\alpha + \beta}$.

Воспользовавшись обратным преобразованием Фурье, найдем выражение для сигнального импульса на выходе резонансного усилителя

$$\begin{aligned} u_c(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega)K(\omega)e^{j\omega t} d\omega = \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \cos \omega_0 t \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\gamma}} + j(\omega - \omega_0)t d(\omega - \omega_0) = \\ &= \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} e^{-\gamma t^2} \cos \omega_0 t. \end{aligned} \quad (3)$$

Амплитуда импульса на выходе резонансного усилителя

$$U_{cm} = \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}}. \quad (4)$$

Энергетический спектр шумов на выходе резонансного усилителя может быть представлен в виде

$$F(\omega) = G^2 |K(\omega)|^2,$$

где G^2 — энергетический спектр «белого шума» на входе резонансного усилителя.

Действующее значение шума на выходе резонансного усилителя

$$U_{ш} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G^2 |K(\omega)|^2 d\omega} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} G^2 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\beta}} d(\omega-\omega_0)} = \frac{G}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{2\beta\pi}. \quad (5)$$

Таким образом, на входе детектора напряжения сигнала и шума могут быть представлены выражениями:

$$u_c(t) = \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} e^{-\gamma t^2} \cos \omega_0 t;$$

$$u_{ш} = \frac{G}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{2\beta\pi}.$$

После детектирования эти напряжения поступают на временной дискриминатор.

2. Временной дискриминатор с одним селекторным импульсом

Схему временного дискриминатора можно мысленно разбить на две части: в первой производится селектирование определенных участков огибающей сигнала, а во второй преобразование отселектированных импульсных напряжений в постоянное напряжение. Не касаясь пока способа получения постоянного напряжения, остановимся на анализе первой части схемы дискриминатора.

Работа, рассматриваемого временного дискриминатора, основана на следующем принципе. С помощью селекторного импульса, длительность которого во много раз меньше длительности сиг-

нального импульса, выделяется участок огибающей сигнала (рис. 1).

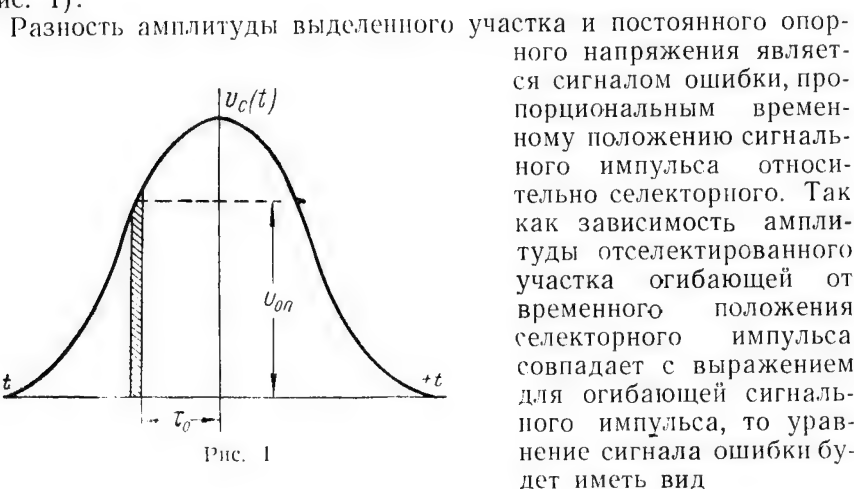


Рис. 1

Разность амплитуды выделенного участка и постоянного опорного напряжения является сигналом ошибки, пропорциональным временному положению сигнального импульса относительно селекторного. Так как зависимость амплитуды отселектированного участка огибающей от временного положения селекторного импульса совпадает с выражением для огибающей сигнального импульса, то уравнение сигнала ошибки будет иметь вид

$$U_{om} = \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} e^{-\gamma t^2} - U_{on}. \quad (6)$$

Под коэффициентом передачи временного дискриминатора, обычно, понимается крутизна зависимости сигнала ошибки от временного рассогласования. В нашем случае коэффициент передачи временного дискриминатора

$$K_{\partial_1} = \left| \frac{d}{dt} U_{om} \right| = \left| \frac{d}{dt} \left(\sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} e^{-\gamma t^2} - U_{on} \right) \right| = \left| 2 \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} \gamma t e^{-\gamma t^2} \right|. \quad (7)$$

Так как наибольший интерес представляет коэффициент передачи вблизи точки нулевого рассогласования, найдем время t_0 , соответствующее нулевому рассогласованию. Если за нулевое положение сигнального импульса принято такое положение, что селекторный импульс расположен в точке максимальной крутизны огибающей сигнала, то интересующее нас значение t_0 находится из уравнения

$$\frac{d^2}{dt^2} [u_c(t)] = \frac{d^2}{dt^2} \left[\sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} e^{-\gamma t^2} \right] = 0$$

и равно

$$t_0 = \sqrt{\frac{1}{2\gamma}}.$$

Коэффициент передачи временного дискриминатора вблизи точки нулевого рассогласования

$$K_{\partial_1} = \left| 2 \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} \gamma t e^{-\gamma t^2} \right|_{t=t_0} = 1,212\gamma \sqrt{\frac{1}{2\alpha}}. \quad (8)$$

Учитывая четвертое предположение, можно утверждать, что величина флуктуаций отселектированного участка огибающей при действии помехи, прямо пропорциональна действующему значению помехи на входе детектора и не зависит от отношения «сигнал/помеха»

$$\sigma = hU_m = h \frac{G}{\sqrt{2\pi}} \sqrt[4]{2\beta\pi},$$

где h — коэффициент пропорциональности.

В этом случае

$$\frac{\sigma}{K_{вд1}} = h \frac{G \sqrt[4]{2\pi}}{\sqrt{2\pi} \cdot 1,212 \gamma}, \quad (9)$$

является мерой среднеквадратичной ошибки отсчета, при условии линейности тракта от временного дискриминатора до шкалы отсчета.

Выражение (9) дает возможность исследовать влияние полосы пропускания резонансного усилителя на среднеквадратичную ошибку отсчета. Найдем величину параметра β , при которой (9) достигает минимального значения. Дифференцируя отношение $\frac{\sigma}{K_{вд1}}$ по β и, приравнявая производную нулю, найдем

$$\beta_{opt} = 3\alpha.$$

Отсюда, полоса резонансного усилителя, а также длительность резонансной системы, при которых получается наименьшая среднеквадратичная ошибка отсчета

$$\Delta f_{opt} = 1,73 \Delta f_1;$$

$$\tau_{opt} = 0,58 \tau_1.$$

Этот же результат несколько другим путем был получен В. И. Сифоровым [3].

Временной дискриминатор с одним селекторным импульсом имеет один существенный недостаток, заключающийся в том, что он с успехом может быть использован только в тех случаях, когда известна амплитуда сигнального импульса. Автоматическая же регулировка опорного напряжения приводит к появлению дополнительных ошибок отсчета.

3. Временной дискриминатор с двумя селекторными импульсами¹

Наличие двух селекторных импульсов — раннего и позднего, располагающихся соответственно на переднем и заднем фронтах сигнала (рис. 2), устраняет влияние амплитуды сигнала на форму зависимости сигнала ошибки от временного рассогласования. Коэффициент передачи временного дискриминатора, рассматриваемого в настоящем параграфе, в два раза больше $K_{\delta 0}$ схемы с одним селекторным импульсом. Эти преимущества выгодно отличают дискриминатор с двумя селекторными импульсами от рассмотренного

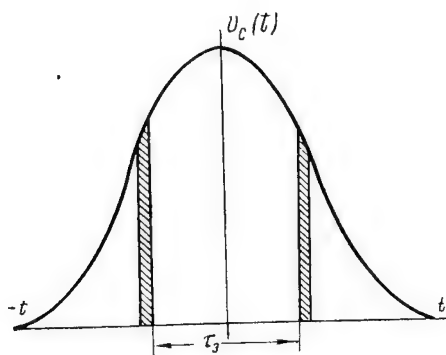


Рис. 2

го выше дискриминатора с одним селекторным импульсом.

Так же как и в предыдущем случае, при исследовании дискриминатора предполагается, что длительность селекторных импульсов ничтожно мала по сравнению с длительностью сигнала ошибки. Воспользовавшись (7), можно написать

$$K_{\delta \partial_2} = 2 K_{\delta \partial_1} = 4 \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} t_0 \gamma e^{-\gamma t^2}. \quad (10)$$

Заметим, что (10) справедливо только вблизи точек нулевых рассогласований.

Если за нулевое положение сигнала принято положение, когда ранний и поздний селекторные импульсы располагаются в точках максимальной крутизны соответствующих фронтов, то при нулевом сигнале ошибки

$$K_{\delta \partial_2} = 4 \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha}} t_0 \gamma e^{-\gamma t_0^2} = 2,424 \gamma \sqrt{\frac{1}{2\alpha}}.$$

Теперь перейдем к вычислению флуктуаций сигнала ошибки при действии флуктуационной помехи. Флуктуационное напряжение на выходе будет представлять разность двух случайных кор-

¹ Описание схемы временного дискриминатора, использованной при экспериментальном исследовании, приведено в разделе 4.

реляционно связанных величин. Среднеквадратичное значение такой разности может быть вычислено по формуле

$$\sigma = \sqrt{\overline{u_0^2} + \overline{u_\tau^2} - 2\overline{u_0 u_\tau}},$$

где $\overline{u_0^2}$ и $\overline{u_\tau^2}$ — средний квадрат флуктуаций амплитуды участка огибающей, выделенного поздним и ранним селекторным импульсами соответственно, $\overline{u_0 u_\tau}$ — функция корреляции.

При симметричности плеч дискриминатора

$$\sigma = \sqrt{2\overline{u_0^2} - 2\overline{u_0 u_\tau}}.$$

Величина $\overline{u_0^2}$ представляет собой квадрат вычисленного ранее среднеквадратичного отклонения и равна

$$\overline{u_0^2} = h^2 \frac{G \sqrt{2\beta\pi}}{2\pi}.$$

Корреляционная функция может быть вычислена [1] как

$$\overline{u_0 u_\tau} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} F(\omega) \cos \omega \tau d\omega,$$

где $F(\omega)$ — энергетический спектр случайной величины;
 τ — время задержки между селекторными импульсами.

В нашем случае корреляционная функция

$$\overline{u_0 u_\tau} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} h^2 G^2 e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\beta}} \cos(\omega - \omega_0)\tau d(\omega - \omega_0) = \frac{h^2 G^2 \sqrt{2\beta\pi}}{2\pi} e^{-\frac{\beta}{2}\tau^2};$$

среднеквадратичное значение флуктуаций сигнала ошибки

$$\sigma = \sqrt{2\overline{u_0^2} - 2\overline{u_0 u_\tau}} = \frac{hG \sqrt[4]{2\beta\pi}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{1 - e^{-\frac{\beta}{2}\tau^2}}. \quad (11)$$

Так как селекторные импульсы помещены в точках максимальной крутизны, то $\tau^2 = \frac{2}{\gamma}$ и величина отношения $\frac{\sigma}{K_{\delta \partial_2}}$ может быть представлена в виде

$$\frac{\sigma}{K_{\delta \partial_2}} = \frac{hG \sqrt[4]{2\beta\pi} \sqrt{2\alpha}}{2,424 \gamma \sqrt{\pi}} \sqrt{1 - e^{-\frac{\beta}{\gamma}}}. \quad (12)$$

Для нас представляет интерес зависимость $K_{в\partial_2} = \varphi\left(\frac{\tau_0}{\tau_1}\right)$, поэтому перепишем (12) в виде

$$\frac{\sigma}{K_{в\partial_2}} = A \frac{\sqrt{\frac{\tau_1}{\tau_0} \left(1 + \frac{\tau_1^2}{\tau_0^2}\right)}}{\frac{\tau_1}{\tau_0^2}} \sqrt{1 - e^{-\left(1 + \frac{\tau_1^2}{\tau_0^2}\right)}}, \quad (13)$$

где $A = \frac{hG}{2,424} \sqrt{\frac{2\pi}{\alpha}} \sqrt{\frac{2}{\pi}}$.

На рис. 3 в относительных единицах построена зависимость $\frac{\sigma}{K_{в\partial_2}} = \varphi\left(\frac{\tau_0}{\tau_1}\right)$. Минимум среднеквадратичной ошибки соответствует значению $\tau_0 = 0,665 \tau_1$, или полосе резонансного усилителя $\Delta f_0 = 1,5 \Delta f_1$. Оптимальная полоса резонансного усилителя при использовании временного дискриминатора с двумя селекторными

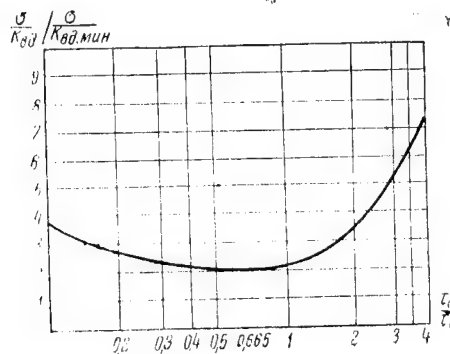


Рис. 3

импульсами незначительно отличается от значения оптимальной полосы при использовании временного дискриминатора с одним селекторным импульсом. Величина же среднеквадратичной ошибки, при использовании второго из рассмотренных типов дискриминаторов, оказывается примерно в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем при использовании первого. Это следует из сравнения (9) и (12) и физически объясняется тем, что во вто-

ром случае коэффициент передачи временного дискриминатора в два раза больше, чем в первом, тогда как среднеквадратичное значение флюктуаций сигнала ошибки увеличивается не более, чем в $\sqrt{2}$ раз.

Рассмотрим зависимость среднеквадратичной ошибки от времени задержки τ_d между селекторными импульсами. Зависимость $K_{в\partial_2}$ от времени задержки между селекторными импульсами¹ может быть получена из (10)

$$K_{в\partial_2} = 2\gamma \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha} \tau_d} e^{-\frac{\gamma \tau_d^2}{4}}. \quad (14)$$

¹ Как видно из рис. 2, время задержки τ_d измеряется между задним фронтом раннего и передним фронтом позднего селекторных импульсов.

Воспользовавшись (11), составим отношение

$$\frac{\sigma}{K_{\beta} \partial_2} = \frac{hG \sqrt[4]{2\beta\pi}}{2\gamma \sqrt{\frac{\gamma\pi}{\alpha}}} \frac{\sqrt{1-e^{-\frac{\beta}{2}\tau_3^2}}}{\tau_3 e^{-\frac{\gamma\tau_3^2}{4}}} = B \frac{\sqrt{1-e^{-\frac{\beta}{2}\tau_3^2}}}{\tau_3 e^{-\frac{\gamma\tau_3^2}{4}}}, \quad (15)$$

где $B = \frac{hG \sqrt[4]{2\beta\pi}}{2\gamma \sqrt{\frac{\gamma\pi}{\alpha}}}$.

Построим зависимость $\frac{\sigma}{K_{\beta} \partial_2} = \varphi(\sqrt{\gamma}\tau_3)$ при $\beta = 2,25 \alpha$, или при $\Delta f_0 = \Delta f_{опт}$. Эта зависимость в относительных единицах приведена на рис. 4. Как видно из рисунка, минимум ошибки по-

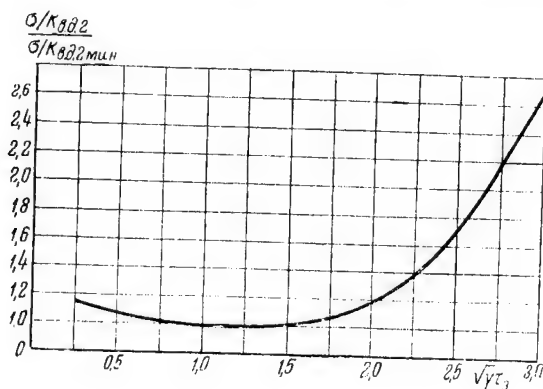


Рис. 4

лучается при значении задержки τ_3 несколько меньшем, чем задержка $\tau_3 = \sqrt{\frac{2}{\gamma}}$, соответствующая положению селекторных импульсов в точках максимальной крутизны фронтов сигнального импульса. Уменьшение задержки от оптимального значения приводит к весьма незначительному увеличению среднеквадратичной ошибки. Увеличение же задержки приводит к резкому возрастанию ошибки отсчета. Физически это можно объяснить следующим образом. Уменьшение задержки от ее значения $\tau_3 = \sqrt{\frac{2}{\gamma}}$ приводит к уменьшению коэффициента передачи временного дискриминатора, однако, одновременно уменьшается и значение флюктуаций сигнала ошибки за счет увеличения корреляционной связи

между плечами временного дискриминатора, поэтому отношение $\frac{\tau}{K_{\alpha \partial_2}}$ остается почти неизменным. При увеличении τ_3 одновременно с уменьшением $K_{\alpha \partial_2}$ возрастает значение τ за счет уменьшения корреляционной связи между вычитаемыми случайными функциями. В результате отношение $\frac{\tau}{K_{\alpha \partial_2}}$ резко возрастает.

В заключение сделаем некоторые замечания о выборе длительности селекторных импульсов. Мы будем полагать, что преобразование импульсных напряжений, полученных в результате селектирования в постоянное напряжение, производится с помощью накопления по амплитуде [4]. В этом случае накопленное напряжение имеет значение, равное средней амплитуде накапливаемых импульсных напряжений. Поэтому увеличение длительности селекторных импульсов при сохранении τ , $\sqrt{\frac{2}{\gamma}}$ не приводит к изменению $K_{\alpha \partial_2}$, но приводит к увеличению значения τ и следовательно нежелательно. Увеличение длительности селекторных импульсов с одновременным сокращением τ_3 приведет к уменьшению $K_{\alpha \partial_2}$ при сохранении прежнего значения τ (здесь имеется в виду, что передний фронт раннего и задний фронт позднего селекторных импульсов при изменении τ_3 сохраняют свое положение в точках максимальной крутизны), что также нежелательно. Из сказанного следует, что длительность селекторных импульсов целесообразно выбирать возможно меньшей.

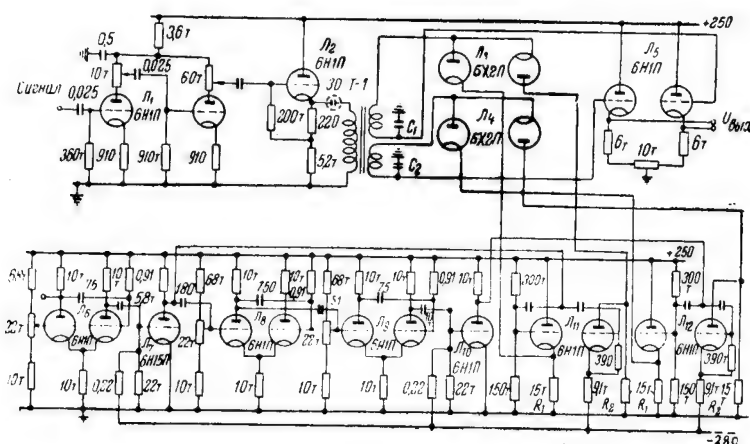
4. Временной дискриминатор с двумя селекторными импульсами

Принципиальная схема временного дискриминатора с двумя селекторными импульсами приведена на рис. 5. Работа схемы временного дискриминатора сводится в основном к следующему.

Сигнальный видеопульс поступает на управляющую сетку видеоусилителя, выполненного на двух половинках лампы L_1 типа 6Н1П и затем через катодный повторитель L_2 (6Н1П) на первичную обмотку трансформатора $T-1$.

Каждая из вторичных обмоток трансформатора $T-1$ включена в цепь заряда накопительных конденсаторов C_1 и C_2 последовательно с диодами L_3 и L_4 (6Х2П). Диоды в нормальном состоянии закрыты напряжением на сопротивлениях R_1 и R_2 . Запирающее напряжение на сопротивлениях R_1 и R_2 создается током ключевых ламп L_{11} и L_{12} (6Н1П). Ключевые лампы закрываются только на время действия селекторных импульсов (раннего и позднего), и только на это время цепи заряда накопительных конденсаторов оказываются замкнутыми. Двухсторонняя провод-

мость диодов Λ_3 и Λ_4 обеспечивает линейность процесса заряда конденсаторов C_1 и C_2 , что является важным с точки зрения помехозащищенности схемы. Дело в том, что напряжение помехи двухполярно и некогерентно с селекторными импульсами, поэтому при линейной цепи заряда оно не создает постоянного потенциала на накопительных конденсаторах. Наличие же добавочного потенциала, при неточной балансировке схемы, может приводить к ошибке за счет помехи.



сами L_s (6Н1П). Длительность импульса задержки может устанавливаться в пределах 20 — 100 мксек.

Генератор позднего селекторного импульса L_s выполнен по схеме аналогичной предыдущим и запускается задним фронтом импульса задержки. Длительность позднего селекторного импульса регулируется в пределах 5—20 мксек.

Данные трансформатора Т-1 следующие:

первичная обмотка — 2000 витков, ПЭЛ 0,12;

вторичная обмотка — 2×2000 витков, ПЭЛ 0,12;

сердечник — железо Ш-12, толщина пакета 12 мм; при намотке обращено особое внимание на симметрию вторичных обмоток.

Рассмотренная схема временного дискриминатора хорошо зарекомендовала себя в процессе эксплуатации. Основными ее преимуществами являются: линейность цепей заряда и разряда накопительных конденсаторов; большой коэффициент передачи, позволяющий не использовать усилителей постоянного тока; высокая стабильность «нуля».

Выводы

1. Из рассмотренных двух типов временных дискриминаторов наибольший практический интерес представляет временной дискриминатор с двумя селекторными импульсами.

2. Для получения наименьшей среднеквадратичной ошибки следует выбирать:

а) полосу пропускания резонансного усилителя $\Delta f_0 = 1,5 \Delta f_1$, т. е. в полтора раза шире, чем ширина спектра импульса на том же уровне;

б) время задержки между селекторными импульсами $\tau_z = \sqrt{\frac{2}{\gamma}}$, т. е. таким, чтобы селекторные импульсы располагались в точках максимальной крутизны фронтов сигнального импульса;

в) длительность селекторных импульсов возможно меньшей.

Выбор постоянной времени цепей накопления умышленно не рассматривался, так как оптимальное значение постоянной времени накопления зависит от конкретных условий, в которых будет работать схема временного дискриминатора. Кроме того, этот вопрос достаточно широко освещен в литературе ([4] и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Бунимович, Флюктуационные процессы в радиоприемных устройствах, «Сов. радио», 1951.

2. И. М. Рыжик, И. С. Градштейн, Таблицы интегралов, рядов и произведений, ГТТИ, 1951.
3. В. И. Сифоров и др., Теория импульсной радиосвязи, Связьиздат, 1951.
4. К. В. Владимирский, О синхронном фильтре, ЖТФ т. 21, вып. I, 1951.

Поступила 25/III 1956 г.

Канд. техн. наук В. И. ПИКИТЕНКО

ЧАСТОТНЫЙ ДИСКРИМИНАТОР С ШИРОКОЙ ПОЛОСой ПРОПУСКАНИЯ

При использовании сигналов, модулированных по частоте, в большинстве случаев желательно увеличивать пределы изменения частоты, так как увеличение отношения $\Delta f / f_0$ повышает помехоустойчивость системы в целом (здесь Δf — полоса пропускания дискриминатора). Вместе с тем, в системах с частотной модуляцией сигнала пределы изменения частоты определяются величиной линейного участка характеристики частотного дискриминатора. Величина этого участка представляет интерес и в ряде специальных устройств, где сигнал, манипулированный по фазе, подается на частотный дискриминатор, с выхода которого снимаются импульсы, пропорциональные величине скачка фазы.

Аналогичный случай имеет место в радионавигаторе с циклическим дифференциальным изменением фазы, где приемное устройство периодически подключается к отдельным вибраторам антенной системы. Фазы пеленгуемого сигнала в различных вибраторах различны, и в результате переключения, в приемном канале проходит сигнал, манипулированный по фазе, который подается на частотный дискриминатор. Выходные импульсы, пропорциональные скачкам фазы, в дальнейшем используются для определения направления прихода пеленгуемого сигнала. Точность определения направления зависит от геометрических размеров антенной системы, точнее — от ее апертуры. Увеличение апертуры антенной системы в реальных условиях приводит к увеличению скачков фазы сигнала в приемном тракте. В свою очередь при больших скачках фазы приходится увеличивать ширину линейного участка характеристики дискриминатора. Иными словами, увеличение линейного участка характеристики дискриминатора позволяет увеличить точность радионавигатора в целом. Вместе с тем, в существующих схемах частотных дискриминаторов линейный участок относитель-

но невелик. Так в наиболее распространенной схеме Фостера и Сили величина $\Delta f/f_0$ имеет порядок 0,1. В другом варианте, построенном по схеме детектора отношений, эта величина также невелика. Лучшей схемой с этой точки зрения является дискриминатор с расстроенными контурами, в которой $\Delta f/f_0$ может достигать величины 0,4—0,5. Для дальнейшего увеличения линейного участка характеристики приходится идти по пути увеличения числа колебательных контуров в схеме, что нежелательно как с точки зрения габаритов аппаратуры, так и с точки зрения стабильности характеристики дискриминатора.

Следует отличать частотный дискриминатор от частотного детектора. Характеристика дискриминатора меняет знак в точке, соответствующей частоте настройки, в то время как выходное напряжение частотного детектора имеет лишь один знак, а переменная составляющая в дальнейшем отделяется и является полезным сигналом. Если используется непрерывный сигнал, модулированный по частоте, то с одинаковым успехом может быть использован как частотный дискриминатор, так и частотный детектор, — полезный сигнал в том и другом случаях будет одинаков. Однако, если частотномодулированный сигнал периодически (реже непериодически) прерывается, то в случае использования частотного детектора, полезный сигнал будет искажен за счет переходных процессов в схеме. Помехи подобного рода при использовании частотного дискриминатора отсутствуют и, следовательно, при прочих равных условиях дискриминатор более универсален.

Помимо линейного участка характеристики, в большинстве случаев предъявляются определенные требования к стабильности характеристики дискриминатора и, особенно, к стабильности частоты настройки. Изменение характеристики определяется, в основном, влиянием внешних климатических условий, в которых работает дискриминатор, т. е. окружающей температуры, влажности воздуха и т. п. Смещение частоты настройки приводит к появлению постоянной составляющей напряжения на выходе дискриминатора и, следовательно, к искажениям выходных сигналов за счет переходных процессов в схеме. Помимо климатических условий, смещение частоты настройки определяется изменением величины сигнала, подаваемого на вход дискриминатора, что имеет место при несовершенной характеристике ограничителя или при изменении напряжения питания каскадов, когда меняется режим работы ограничителя или усиление последующих каскадов.

Вследствие этого схема дискриминатора должна, по возможности, удовлетворять следующим основным требованиям:

- а) величина линейного участка характеристики должна быть достаточной;
- б) характеристика и, особенно, частота настройки должны быть стабильны;

- в) крутизна характеристики должна быть достаточной;
- г) габариты должны быть, по возможности, малыми.

Автором была предложена и исследована схема частотного дискриминатора, построенного на одиночном контуре и имеющего широкий линейный участок характеристики. Работа схемы основана на использовании различного знака изменения амплитуд напряжений на реактивных элементах последовательного контура при изменении частоты сигнала, подаваемого на этот контур. При изменении частоты сигнала амплитуда напряжения на одном из реактивных элементов уменьшается, в то время как на другом — возрастает. Напряжение с реактивных элементов подается на детектирующие цепочки для получения выходного сигнала пропорционального разности напряжений на реактивных элементах.

В дискриминаторе Фостера и Сили используется зависимость фазового сдвига от частоты между сигналом на входе и напряжением на реактивном элементе (емкости) дискриминатора, т. е. напряжения на входе детектирующих цепочек напоминают напряжения на половинках схемы фазового дискриминатора. Разность напряжений на половинках схемы, следовательно, и характеристика дискриминатора изменяются по косинусоидальному закону при изменении частоты. Таким образом, лишь незначительную часть характеристики с известным приближением можно считать линейной. В схеме дискриминатора с расстроенными контурами при изменении частоты сигнала напряжение на одном из контуров растет, в то время как на другом — падает. Напряжения на контурах детектируются и вычитаются, благодаря чему характеристика пропорциональна разности амплитуд напряжений на контурах.

Для рассмотрения схемы, построенной на одиночном контуре, обратимся к рис. 1а, где выполняется условие $C_0 \gg C$, т. е. емкость

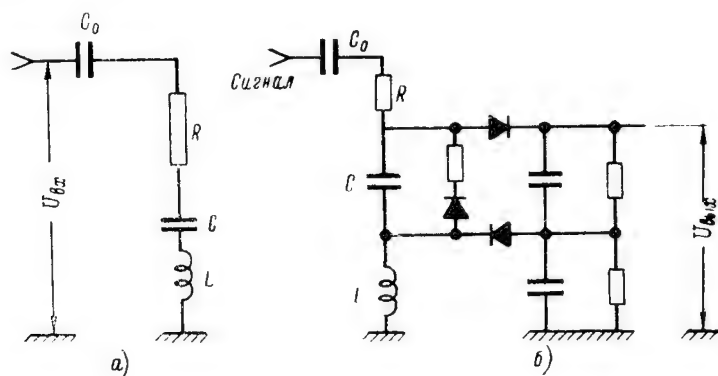


Рис. 1. Схема дискриминатора

C_0 в широких пределах изменения частоты не влияет на характер колебаний, близких к резонансной частоте контура.

При неизменной амплитуде напряжения сигнала, подаваемого на вход контура, напряжение на индуктивности

$$\dot{U}_L = j \frac{\dot{U}_{ax}}{R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)} \omega L.$$

При тех же условиях напряжение на емкости

$$\dot{U}_C = j \frac{\dot{U}_{ax}}{R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)} \frac{1}{\omega C}.$$

Полагая $k = \omega/\omega_p$, где ω_p — резонансная частота контура, а ω — частота сигнала, для напряжений на индуктивности и емкости получим выражения:

$$\dot{U}_L = j \frac{\dot{U}_{ax} Q}{1 + jQ \left(k - \frac{1}{k} \right)} k \quad \text{и} \quad \dot{U}_C = -j \frac{\dot{U}_{ax} Q}{1 + jQ \left(k - \frac{1}{k} \right)} \frac{1}{k},$$

где Q — добротность контура.

Модули этих выражений

$$|\dot{U}_L| = \frac{U_{ax} Q}{\sqrt{1 + Q^2 \left(k - \frac{1}{k} \right)^2}} k \quad \text{и} \quad |\dot{U}_C| = \frac{U_{ax} Q}{\sqrt{1 + Q^2 \left(k - \frac{1}{k} \right)^2}} \frac{1}{k}.$$

Разность абсолютных значений напряжений на индуктивности и емкости

$$\Delta U = \frac{U_{ax} Q}{\sqrt{1 + Q^2 \left(k - \frac{1}{k} \right)^2}} \left(k - \frac{1}{k} \right).$$

Зависимость разности амплитуд напряжений на реактивных элементах от частоты подаваемого сигнала приведена на рис. 2, где различные кривые соответствуют определенным значениям добротности контура. В дискриминаторе тем или иным способом вычитаются напряжения, пропорциональные амплитудам напряжений на реактивных элементах контура. Способ вычитания определяет разновидности схемы, простейшая из которых приведена на рис. 1б. Для выходного напряжения схемы справедливо выражение

$$U_{вых} = \frac{U_{ax} Q K_L}{\sqrt{1 + Q^2 \left(k - \frac{1}{k} \right)^2}} \left(k - \frac{1}{k} \right),$$

где $\beta = K_C/K_L$, а K_C и K_L — соответственно коэффициенты передачи напряжений на емкости и индуктивности.

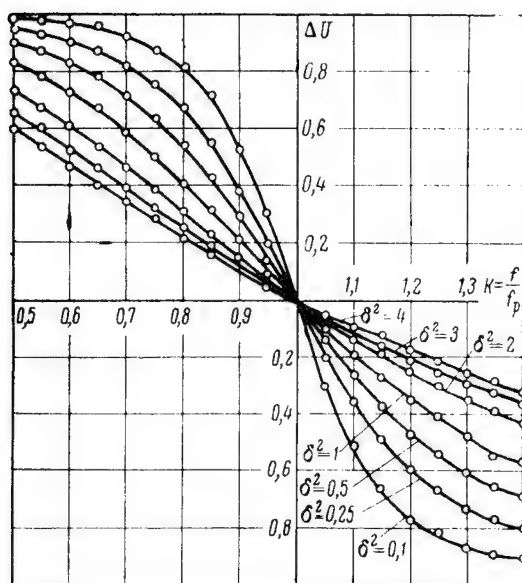


Рис. 2. Зависимость разности амплитуд на реактивных элементах контура от частоты

Если выходное напряжение достаточно быстро отображает изменение напряжений на реактивных элементах контура и, следовательно, можно считать детекторы безинерционными, последнее выражение определяет характеристику дискриминатора. Нетрудно убедиться, что наклон характеристики зависит от знака и величины вычитаемых напряжений. Так для схемы рис. 1б при частотах меньших, чем резонансная, выходное напряжение положительно. Изменив полярность включения диодов, получим характеристику, где низким частотам будет соответствовать отрицательное напряжение. Аналогичное изменение знака выходного напряжения можно получить, поменяв местами индуктивность и емкость контура.

Вид характеристики дискриминатора зависит от добротности контура и от отношения коэффициентов передачи детектирующих ячеек. При равенстве K_C и K_L характеристика подобна рис. 2. Зависимость характеристики от отношения $K_C/K_L = \beta$ иллюстрируется рис. 3а, б и в. При $\beta = 0,6—0,7$ характеристика для $Q =$

$\delta = 0,7$ имеет достаточно широкий участок, где выходное напряжение зависит от частоты практически линейно. Частота настройки контура определяется по кривым рис. 3. Например, для $\beta = 0,6$ резонансная частота контура, для частоты настройки дискриминатора f_0 , будет равна $f_p = f_0 / 0,775$.

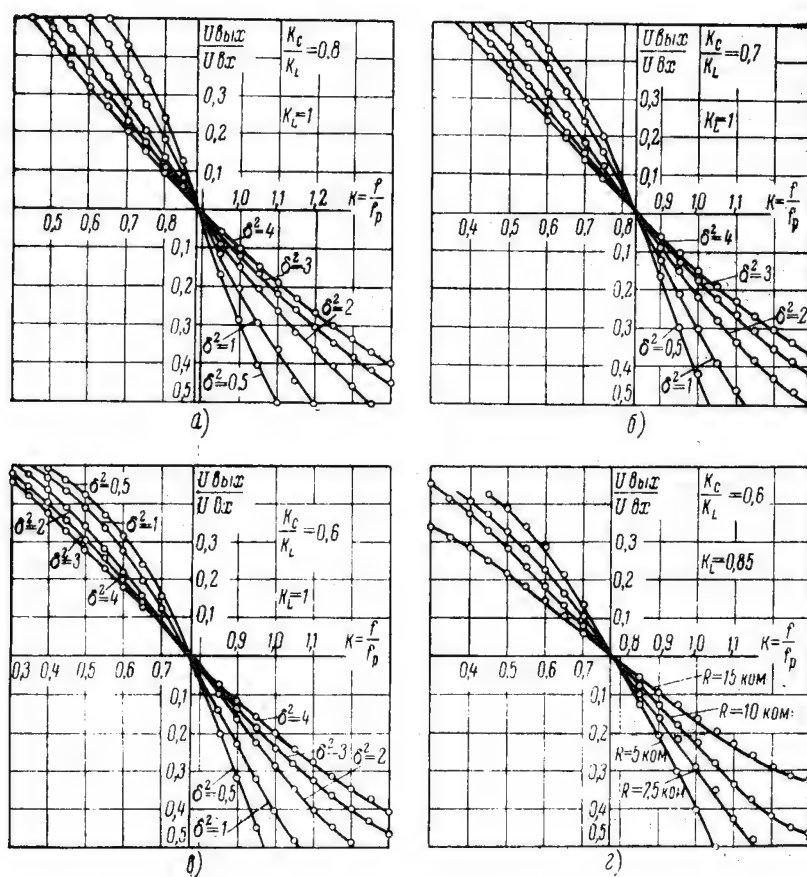


Рис. 3. Характеристики дискриминатора при различных значениях β

Семейство экспериментальных характеристик представлено на рис. 3г, где видна зависимость характеристик от величины сопротивления R и, следовательно, от значения затухания контура $\delta = 1/Q$. Кривые соответствуют $\beta = 0,6$ при частоте настройки контура $f_p = 9$ кГц. Указанное семейство кривых позволяет без труда определить величину сопротивления потерь для получения

наибольшего линейного участка характеристики. Некоторый «завал» характеристики в области очень низких частот объясняется влиянием емкости C_0 . Следует отметить, что сопротивление потерь R учитывается подбором соответствующей добротности контура.

Основными достоинствами рассматриваемой схемы являются большой линейный участок характеристики и малые габариты, определяемые на частотах порядка десятков $кГц$, в основном, габаритами индуктивности дискриминатора. Следовательно, подобный дискриминатор может быть применен в системах, для которых величина линейного участка наиболее существенна или в системах, где основное требование предъявляется к габаритам аппаратуры. Последнее требование в ряде специальных систем настолько важно, что для уменьшения габаритов аппаратуры, в отдельных случаях, коренным образом приходится изменять принципиальные схемы устройств и искать новые пути их построения.

Для иллюстрации на рис. 4 показаны сравнительные габариты

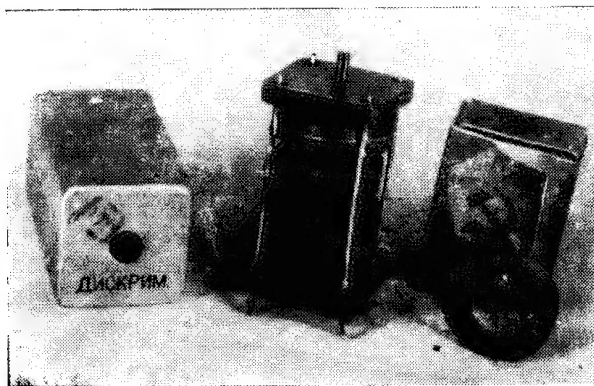


Рис. 4. Сравнительные габариты дискриминаторов

двух дискриминаторов с широким линейным участком, использованные в реальной системе, причем, справа расположена индуктивность одноконтурного дискриминатора, а слева — индуктивности дискриминатора с расстроенными контурами.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. W. Fair, a. R. M. Godfrey, Electrical Communication, 26, № 1, 1949.
2. В. А. Волгов, Кандидатская диссертация, ЛЭТИ.

Поступила 10/II 1957 г.

Канд. техн. наук В. И. ВИНУКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕТЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ РАДИОМЕТРА

В ряде производственных процессов необходимо обеспечить непрерывный дистанционный контроль или измерение температуры нагретого тела. Для этой цели применяют приборы, действие которых основано на измерении теплового излучения тела в видимом, ультрафиолетовом или инфракрасном диапазонах волн. Приборы указанного типа позволяют измерять непосредственно температуру тела только в том случае, если между телом и прибором отсутствует факел пламени и частицы материала. При наличии факела пламени измерительные приборы, построенные на этом принципе, определяют температуру факела пламени. В диапазоне более длинных волн (например, в диапазоне весьма коротких радиоволн) размеры частиц пламени значительно меньше длины волны излучения. Можно полагать, что в этом диапазоне волн излучение пламени будет мало. В этой связи представляют интерес излучение нагретых тел (металлов и диэлектриков) в диапазоне радиоволн и влияние пламени на точность измерений температуры в этом диапазоне.

В настоящей работе рассматривается первый из поставленных вопросов.

Под тепловым излучением тела понимается процесс возникновения лучистой энергии, являющийся следствием превращения тепловой энергии тела в лучистую энергию. Свойства тела характеризуются коэффициентами излучения (b_{fT}) и поглощения (α_{fT}). Величины b_{fT} и α_{fT} для данного тела зависят от частоты и температуры. На эту зависимость указывают индексы f и T . Основным законом теплового излучения является закон Кирхгофа,

устанавливающий следующую зависимость между излучением и поглощением лучистой энергии телом

$$\frac{b_{fT}}{\lambda_{fT}} = b_{fT}^{\circ}, \quad (1)$$

где b_{fT}° — удельная интенсивность излучения абсолютно черного тела.

Закон Кирхгофа справедлив для тел, геометрические размеры которых значительно превосходят длину волны излучения [1]. Интенсивность излучения абсолютно черного тела в общем случае определяется формулой Планка

$$b_{fT}^{\circ} = \frac{c^2 h^2}{\lambda^5} \left(e^{\frac{ch}{kT}} - 1 \right)^{-1}, \quad (2)$$

где $h = 6,624 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек — постоянная Планка;
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ вт·сек/град — постоянная Больцмана;
 c — скорость света;
 T — температура тела, °K.

Максимум функции (2) лежит в области ультрафиолетового или видимого диапазона. Для длинноволновой части спектра b_{fT}° определяется формулой Релея-Джинса

$$b_{fT}^{\circ} = \frac{kT}{c^2} f^2. \quad (3)$$

На основании закона Кирхгофа излучательная способность тела находится через его поглощательную способность и интенсивность излучения абсолютно черного тела.

Оценим величину интенсивности теплового излучения различных материалов в диапазоне сверхвысоких радиочастот. Погрешность, вносимая наличием пламени и частиц материала, находящихся между телом и измерителем, не рассматривается. Предполагается, что геометрические размеры тела велики по сравнению с длиной волны излучения. Рассматриваются непрозрачные тела, т. е. такие, которые поглощают всю проходящую в них энергию в рассматриваемом диапазоне частот. В этом случае на основании закона сохранения энергии справедливо следующее соотношение между спектральными коэффициентами поглощения α_{fT} и отражения ρ_{fT}

$$\alpha_{fT} + \rho_{fT} = 1; \quad (4)$$

α_{fT} и ρ_{fT} представляют собой энергетические величины. Коэффициент отражения ρ_{fT} может быть найден из уравнений Макс-

велла через коэффициент отражения электромагнитных волн на границе раздела двух сред R_{fT} на основании соотношения

$$\rho_{fT} = R_{fT}^2. \quad (5)$$

Первой средой в рассматриваемом случае является воздух, второй средой — тело, тепловое излучение которого исследуется. Из рассмотрения отражения электромагнитных волн на границе раздела двух сред получим следующее выражение для R_{fT} [2]. Обозначим предварительно:

ε' — комплексная диэлектрическая проницаемость среды

$$\varepsilon' = \varepsilon \left(1 - \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon} \right);$$

φ — угол падения электромагнитных волн;

σ — проводимость среды;

μ — магнитная проницаемость среды.

Для электромагнитной волны, поляризованной в плоскости падения,

$$R_{fT} = \frac{\varepsilon'_2 \mu_2 \cos \varphi - \sqrt{\varepsilon'_1 \mu_1} \sqrt{\varepsilon'_2 \mu_2 - \varepsilon'_1 \mu_1 \sin^2 \varphi}}{\varepsilon'_2 \mu_2 \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon'_1 \mu_1} \sqrt{\varepsilon'_2 \mu_2 - \varepsilon'_1 \mu_1 \sin^2 \varphi}} \quad (6)$$

(индексы 1 и 2 соответствуют первой и второй средам).

Для поляризации в плоскости, перпендикулярной плоскости падения

$$R_{fT} = \frac{\sqrt{\varepsilon'_1 \mu_1} \cos \varphi - \sqrt{\varepsilon'_2 \mu_2 - \varepsilon'_1 \mu_1 \sin^2 \varphi}}{\sqrt{\varepsilon'_1 \mu_1} \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon'_2 \mu_2 - \varepsilon'_1 \mu_1 \sin^2 \varphi}}. \quad (7)$$

В дальнейшем изложении будем полагать следующее:

а) исследуемое тело не обладает ферромагнитными свойствами

$$\mu_1 = \mu_2;$$

б) излучение нагретого тела рассматривается в направлении, близком к направлению внешней нормали, т. е. $\varphi \rightarrow 0$.
Обозначим

$$m' = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \sqrt{\frac{1 + j \frac{\sigma_2}{\omega \varepsilon_2}}{1 + j \frac{\sigma_1}{\omega \varepsilon_1}}}; \quad (8)$$

на основании сделанных допущений получим для (6) и (7)

$$R_{fT} = \pm \frac{m' - 1}{m' + 1}. \quad (9)$$

Знаки \pm перед (9) определяют фазовые соотношения при отражении. В дальнейшем изложении знаки \pm опускаются, так как интерес представляют только амплитудные соотношения. Первой средой является воздух, для которого преобладающими являются токи смещения, т. е.

$$\frac{\sigma_1}{\omega \varepsilon_1} \ll 1. \quad (10)$$

Извлекая корень из комплексного выражения (8) и учитывая (10), получим для m'

$$m' = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{2\varepsilon_1}} \left\{ \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma_2^2}{\omega^2 \varepsilon_2^2}}} + j \sqrt{-1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma_2^2}{\omega^2 \varepsilon_2^2}}} \right\}. \quad (11)$$

Определив m' , найдем на основании (4), (5) и (9) коэффициент поглощения, а следовательно, и энергию, излучаемую нагретым телом. Для сокращения записи в (11) обозначим:

$$\xi = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{2\varepsilon_1}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma_2^2}{\omega^2 \varepsilon_2^2}}};$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{2\varepsilon_1}} \sqrt{-1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma_2^2}{\omega^2 \varepsilon_2^2}}}.$$

В новых обозначениях

$$m' = \xi + j\beta.$$

На основании (5) и (9) находится коэффициент отражения по мощности

$$\rho_{rr} = \frac{(\xi - 1)^2 + \beta^2}{(\xi + 1)^2 + \beta^2}.$$

Коэффициент поглощения определяется на основании (4)

$$\alpha_{rr} = \frac{4\xi}{(\xi + 1)^2 + \beta^2} \left[\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma_2^2}{\omega^2 \varepsilon_2^2}} \right) + \sqrt{2} \right]^2 - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma_2^2}{\omega^2 \varepsilon_2^2}} \right)^2. \quad (12)$$

В результате несложных преобразований для знаменателя (12) получим следующее приближенное выражение

$$2 \left\{ \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \sqrt{1 + \frac{\sigma_2^2}{\omega^2 \varepsilon_2^2}} + \sqrt{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma_2^2}{\omega^2 \varepsilon_2^2}} \right)} \right\}.$$

Для коэффициента поглощения α_{fT} получим

$$\alpha_{fT} \approx \frac{2\sqrt{2}\sqrt{1+\sqrt{1+\sigma_2^2/\omega^2\epsilon_2^2}}}{\sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}(1+\tau_2^2/\omega^2\epsilon_2^2)} + \sqrt{2}\sqrt{1+\sqrt{1+\sigma_2^2/\omega^2\epsilon_2^2}}}. \quad (13)$$

Пренебрегая в знаменателе (13) вторым слагаемым, по сравнению с первым, получим

$$\alpha_{fT} \approx \frac{2\sqrt{2}\sqrt{1+\sqrt{1+\sigma_2^2/\omega^2\epsilon_2^2}}}{\sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}(1+\sigma_2^2/\omega^2\epsilon_2^2)}}. \quad (14)$$

Соотношение (14) несправедливо при малой величине τ . При $\tau \rightarrow 0$ равенство (4), лежащее в основе вывода, несправедливо.

Для металлов соотношение (14) можно упростить. Из электромагнитной теории следует [3], что для металлов

$$\sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \sqrt{g\tau}, \quad (15)$$

где g — электропроводность металла (в электростатических единицах);

τ — период колебаний электромагнитного поля.

Для металлов

$$\sigma_2/\omega\epsilon_2 \gg 1,$$

поэтому для приближенной оценки излучения металлов можно считать

$$\sqrt{2}\frac{\sqrt{1+\sqrt{1+\sigma_2^2/\omega^2\epsilon_2^2}}}{\sqrt{1+\sigma_2^2/\omega^2\epsilon_2^2}} \approx 1.$$

При сделанных допущениях получим завышенное значение коэффициента поглощения металлов. Для окончательного определения α_{fT} учтем следующие соотношения:

$$\tau = \frac{\lambda}{c},$$

где c — скорость света;

λ — длина волны исследуемого излучения;

$$g = \frac{1}{\gamma}$$

где γ — удельное сопротивление, $\text{ом} \cdot \text{см}$.

Величина γ зависит от температуры

$$\gamma = \gamma_0 \frac{T}{273},$$

где γ_0 — удельное сопротивление при 0°C .
В результате получим выражение для коэффициента поглощения металлов

$$\alpha_{fT} \approx 0,002 \sqrt{\frac{\gamma_0}{k}} T. \quad (16)$$

Для металлов $\gamma_0 \approx 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$; (для меди $\gamma_0 = 1,58 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$; для алюминия $\gamma_0 = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{см}$). Коэффициент поглощения для металлов при этих данных имеет порядок не выше 10^{-3} — 10^{-4} .

Для ряда диэлектриков в диапазоне сантиметровых радиоволн $\epsilon, \epsilon_1 \approx 5-10$. Отношение $\epsilon_2/\omega\epsilon_1$ равно нескольким единицам. Из (13) и (14) следует, что при этих данных для диэлектриков α_{fT} имеет порядок 10^{-1} .

Найдем порядок величины мощности, поступающей в антенну радиометра, направленную на нагретое тело. Будем полагать, что между антенной и нагретым телом отсутствует среда, поглощающая или излучающая электромагнитную энергию. Излучающая поверхность тела в общем случае составляет некоторый угол с осью диаграммы направленности антенны (рис. 1). На основании закона Кирхгофа можно определить спектральную яркость нагретого тела

$$b_{fT} df = \alpha(f, T) \frac{kT}{c^2} f^2 df. \quad (17)$$

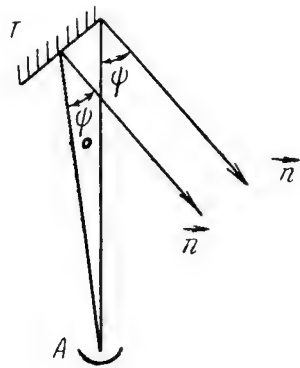


Рис. 1

A — антенна радиометра, T — тело, температура которого измеряется, n — внешняя нормаль к поверхности тела

Температура тела в общем случае может быть различной в отдельных его участках. Предположим, что излучение нагретого тела подчиняется закону Ломберта. (Сделанное допущение является грубым и применимо только для грубой оценки величины излучения тел). В этом случае поток энергии в диапазоне частот f и $f + df$ через единичную площадку в плоскости раскрытия антенны определяется выражением

$$dP_{f\Omega} = \frac{kT}{c^2} f^2 \alpha(f, T) \cos \psi df d\Omega, \quad (18)$$

где $d\Omega$ — телесный угол, под которым видна элементарная площадка излучающего тела из плоскости раскрытия антенны;

ψ — угол между внешней нормалью, проведенной к единичной площадке, и направлением на антенну.

Полагая, что размеры излучающего тела значительно меньше, чем расстояние между антенной и излучающим телом, можно считать

$$\psi \approx \psi_0 = \text{const.}$$

Пусть A — эффективная площадь приемной антенны. Антенна будет принимать излучение только одной поляризации, т. е. половину всей подходящей к ней энергии. Площадь приемной антенны

$$A = \frac{\lambda^2}{4\pi} G(\Omega),$$

где $G(\Omega)$ — коэффициент усиления антенны, зависящий от координат и от частоты.

Радиометр принимает энергию нагретого тела в некотором определенном диапазоне частот $f_2 - f_1 = \Delta f$. Полная энергия, принимаемая радиометром, определяется следующим выражением

$$P = \frac{k \cos \psi_0}{8\pi} \int_{f_1}^{f_2} df \int_{\Omega_0} T(\Omega) \alpha(f, T) G(f, \Omega) d\Omega, \quad (19)$$

где Ω_0 — телесный угол, под которым исследуемое тело видно из плоскости раскрыва антенны.

Полоса частот Δf много меньше, чем частоты f_1 и f_2 . Поэтому в диапазоне частот Δf величины в выражении (19) можно приближенно считать независимыми от частоты.

Мощность, принимаемую антенной от нагретого тела, можно рассматривать как результат увеличения температуры сопротивления излучения антенны ΔT_a . На основании соотношения (19) получим

$$\Delta T_a \approx \frac{\alpha(f_2, T)}{8\pi} \cos \psi_0 \int_{\Omega_0} T(\Omega) G(\Omega) d\Omega. \quad (20)$$

Из соотношений (19) и (20) следует, что в общем случае температура сопротивления излучения антенны ΔT_a определяется некоторым интегральным значением температуры исследуемого тела. Найдем эквивалентную температуру антенны радиометра, направленной на нагретое тело при нижеперечисленных условиях. Коэффициент усиления антенны $G(0) = 1000$. Это соответствует параболической антенне с диаметром раскрыва зеркала порядка 40 см. Угол, под которым видно нагретое тело из плоскости раскрыва антенны, 10^{-2} стерадиан. Под таким углом виден диск площадью в 1 м^2 , находящийся на расстоянии 10 м от антенны и помещенный нормально к оси диаграммы направленности. В пределах данного телесного угла коэффициент усиления антенны в первом

приближении можно считать постоянным. В результате интегрирования (20) получим

$$\Delta T_a \approx 0,4 \alpha(f_0, T) T \cos \psi_0.$$

При чувствительности радиометра Γ^* , достижимой в настоящее время, наименьшее разрешаемое приращение температуры тела будет

$$T_{\min} = 0,4 \alpha(f_0, T) \cos \psi_0 \Gamma^* \quad (21)$$

при $\alpha(f_0, T) \approx 10^{-1}$

$$T_{\min} = \left(\frac{25}{\cos \psi_0} \right)$$

(для металлов T_{\min} в 100—1000 раз больше).

Расчет показывает, что при измерении температуры реальных тел с помощью радиометра чувствительность значительно меньше, чем для случая абсолютно черного тела [5].

Радиоизлучение нагретого тела, проходя через пламя, может в значительной степени поглощаться. Поглощение пламени может зависеть от его состава, а также от скорости движения электронов и ионов, входящих в его состав. В периодической литературе вопросы поглощения радиоволн в пламени отражены в работе [6], посвященной исследованию химической активности группы ОН путем измерения поглощения электромагнитных волн сантиметрового диапазона в пламени. В работе подтверждено, что затухание электромагнитных волн пропорционально парциальному давлению электронов в пламени. Найдено, что добавление 0,1% галогенов к пламени, содержащему щелочи, значительно уменьшает затухание электромагнитных волн. По данным автора поглощение электромагнитных волн в пламени составляет десятые доли децибелла на сантиметр.

Проведенный выше анализ показывает, что излучение многих диэлектриков в диапазоне весьма коротких радиоволн достаточно интенсивно. Излучение же металлов в этом диапазоне волн на несколько порядков ниже, чем диэлектриков. При современной чувствительности радиометра дистанционное измерение температуры нагретых диэлектриков возможно. Вопрос о влиянии пламени на точность измерений является весьма существенным.

Автор весьма благодарен профессору Ю. Я. Юрову за ценные советы и указания.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Рытов, Теория тепловых шумов, «Радиотехника», т. 10, № 2, 1955.
2. Л. Н. Щуккин, Распространение радиоволн, Связьиздат, 1940.

3. А. П. И в а н о в, Электрические источники света, ч. I, 1938.
4. С. Р а м о и Дж. У и н н е р и, Поля и волны в современной радиотех-
нике, ГИТТЛ, 1950.
5. В. С. Т р о и ц к и й, ЖТФ, т. 22, вып. 3, 1952.
6. K. E. Shuler, J. Weber, The Journal of Chemical Physics, v 22,
№ 3, 1954.

Поступила 26/I 1957 г.

Инж. В. Н. КАЧУРИН

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯТОРА МАЛЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Введение

В современных устройствах различного типа часто возникает задача преобразования (модуляции) сигнала постоянного тока в переменный, с определенной частотой (несущей), с целью его дальнейшего усиления. К модуляторам, работающим в усилителях постоянного тока или в следящих системах с потенциометрическим датчиком постоянного тока и выходом на переменном токе, предъявляются следующие основные требования:

1. Чтобы при нулевом значении входного сигнала постоянного тока выходной сигнал переменного тока был бы равен нулю.
2. Фаза выходного переменного напряжения модулятора, используемого в следящей системе, должна определяться полярностью сигнала постоянного тока, поступающего от измерительного устройства (датчика).

Известно, что модуляция сигналов малой мощности и низких напряжений (0—100 мв) связана с большими трудностями и большинство известных схем и типов модуляторов не обеспечивают, в заданном диапазоне, необходимой линейности и стабильности характеристик при температурных воздействиях [5, 6, 7, 8].

3. Модулятор должен быть стабильным во времени.

Балансный модулятор на электронных лампах (рис. 1) с анодным питанием от переменного тока по сравнению с другими типами и схемами модуляторов имеет ряд преимуществ:

1. Возможность получения значительного усиления входного сигнала.
2. Отсутствие стабилизированного источника постоянного тока высокого напряжения.

3. Температурная стабильность характеристик.
4. Простота конструкции.

Схема модулятора работает следующим образом: при положительном полупериоде анодного напряжения и отсутствии сигнала, токи в нагрузках R'_a и R''_a равны по величине и обратны по направлению, в результате чего точки a и b имеют равный потенциал и выходное напряжение равно нулю. При подаче сигнала указанной полярности в нагрузку потечет результирующий ток, равный $i_a = i'_a - i''_a$ трапецидальной формы. В точках a и b возникает разность потенциалов соответствующей фазы. При изменении полярности фаза изменится на 180° .

На рис. 2 указаны мгновенные значения тока в нагрузке:

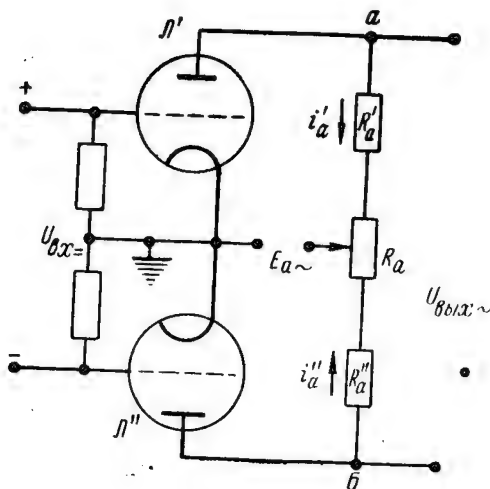


Рис. 1

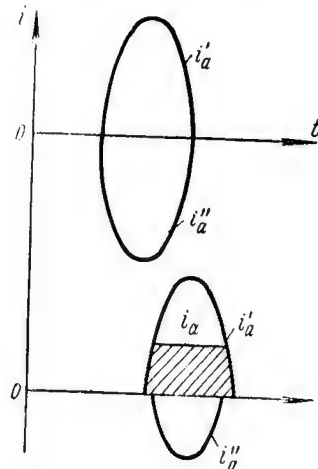


Рис. 2

- а) при отсутствии входного сигнала;
- б) при наличии входного сигнала.

Однако данная схема обладает и существенными недостатками, ограничивающими ее техническое применение. При подаче переменного напряжения на аноды триодов в течение положительного полупериода лампы пропускают ток, а в течение отрицательного полупериода — заперты. Но вследствие вторичной эмиссии анодов [4] и наличия емкостей ламп и монтажа, триоды сохраняют некоторую проводимость и в отрицательный полупериод, в результате чего на выходе схемы появляются отрицательные пики. Кроме того, паразитные емкости плеч моста (ламп, монтажа) для гармонических составляющих анодного напряжения создают различные фазовые сдвиги, в результате чего не удается получить напряже-

ние небаланса менее 0,5—1,5 в. Поэтому схема балансного модулятора в простейшем ее исполнении не обеспечивает модуляцию сигнала малой мощности.

На рис. 3 приведена схема модулятора, позволяющая осуществить модуляцию сигнала в широком диапазоне низких напряжений (0—100 мв). В основу данной схемы положен балансный принцип модуляции сигнала, но анодное питание триодов осуществляется однополупериодным напряжением. Вследствие этого в схеме отсутствуют отрицательные пики в выходном напряжении. Это обстоятельство в свою очередь позволило включить компенсирующие емкости C' и C'' и тем самым осуществить выравнивание фазовых сдвигов для первой гармоники анодного напряжения.

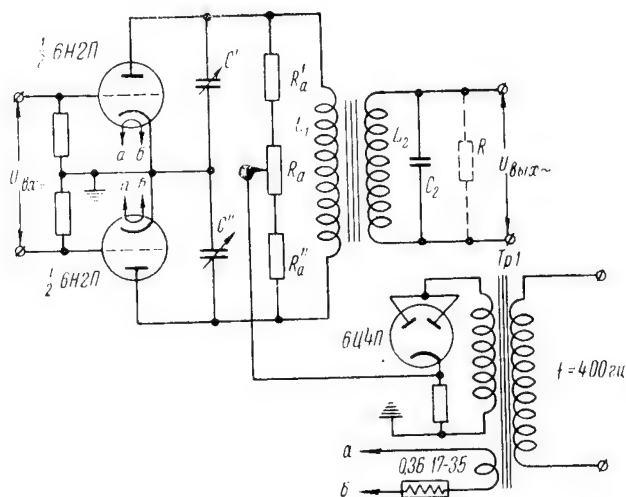


Рис. 3

Связь выхода модулятора с одностактным входом усилителя осуществляется контуром связи, выполненным в виде трансформатора с резонансной цепочкой во вторичном контуре, настроенной на частоту несущей. Для высших частот резонансный контур связи представляет меньшее сопротивление, так для второй гармоники

$$Z_2 = \frac{r_{рез}}{1,5Q},$$

где Z_2 — сопротивление для второй гармоники;
 $r_{рез}$ — резонансное сопротивление контура;
 Q — добротность контура.

Благодаря этому удалось значительно снизить уровень небаланса, определяемый, в основном, небалансом высших гармоник. Величина небаланса, приведенная ко входу модулятора, при бареттировании цепей накала триода и колебаниях опорного напряжения в пределах $\pm 10\%$, не превышает 2,3 мв.

Ниже приводится анализ, расчет и экспериментальное исследование схемы модулятора, представленного на рис. 3.

А. АНАЛИЗ РАБОТЫ МОДУЛЯТОРА

1. Анализ работы выпрямителя модулятора

Для простоты изложения общего метода расчета модулятора, удобнее начать с расчета однополупериодного выпрямителя.

На рис. 4 представлена эквивалентная схема однополупериодного выпрямителя с идеальным вентиляем, позволяющим протекать току в течение одного полупериода и полностью прекращающим ток в течение другого полупериода.

На основании уравнения выпрямителя

$$u_a = u - i_a R_n$$

находим

$$u = u_a + i_a R_n = i_a (R_i + R_n) = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

или

$$i_a = \frac{U_m}{R_i + R_n} \sin \omega t = I_m \sin \omega t \text{ при } 0 \leq \omega t \leq \pi; \\ i_a = 0 \text{ при } \pi \leq \omega t < 2\pi, \quad (2)$$

где $I_m = \frac{U_m}{R_i + R_n}$;

i_a — мгновенное значение анодного тока;

R_i — внутреннее сопротивление диода;

u — мгновенное значение вторичного напряжения трансформатора $Tr1$ (рис. 3).

u_a — мгновенное значение напряжения на диоде.

Таким образом, зная R_n , i_a и определив R_i из динамической характеристики диода, можно определить величину вторичного напряжения опорного трансформатора.

Выходной ток выпрямителя можно выразить аналитически при помощи ряда Фурье в виде

$$i = B_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cos k\alpha + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin k\alpha, \quad (3)$$

где $\alpha = \omega t$.

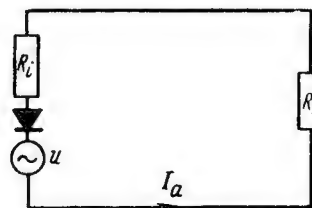


Рис. 4

Коэффициенты этого ряда определяются следующими интегралами:

$$\left. \begin{aligned} B_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i \cos kx \, dx; \\ A_k &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i \sin kx \, dx; \\ B_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i \, dx. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Следует отметить, что постоянный член B_0 в данном случае изображает просто среднее значение тока, т. е.

$$I_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i \, dx.$$

На основании уравнения (2)

$$I_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_m \sin \alpha d\alpha = \frac{I_m}{\pi}.$$

Произведя интегрирование и пользуясь уравнением (2), получим для силы тока

$$i = I_m \left[\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{\pi} \sum_{k=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{\cos k\omega t}{(k+1)(k-1)\dots} \right], \quad (5)$$

т. е. в разложении отсутствуют нечетные гармоники, за исключением первой.

2. Анализ работы и расчет балансного модулятора

Для дальнейшего расчета модулятора примем к сведению следующее положение. Известно [3], что если для простоты расчета представить, что опорное напряжение изменяется по косинусоидальному закону ($U_m \cos \omega t$), то коэффициенты составляющих остроконечного импульса можно определить по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 &= \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\pi (1 - \cos \theta)}; \\ \alpha_1 &= \frac{\theta - \cos \theta \sin \theta}{\pi (1 - \cos \theta)}; \\ &\dots \dots \dots \\ \alpha_n &= \frac{2 \cdot 2 \sin n\theta \cos \theta - n \cos n\theta \sin \theta}{\pi (n^2 - 1)(1 - \cos \theta)}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_n \dots$, — составляющие остроконечного импульса;
 Θ — угол отсечки.

Угол отсечки представляет собой увеличенное в π раз отношение продолжительности импульса t_i к периоду основной частоты T и определяется выражением

$$\Theta = \pi \frac{t_i}{T}.$$

На практике угол отсечки удобнее выражать в градусах. Так для однополупериодного напряжения, снимаемого с выпрямителя, имеем

$$t_i = \pi = 180^\circ;$$

$$T = 2\pi = 360^\circ;$$

угол отсечки

$$\Theta = 180^\circ \frac{t_i}{T} = 180^\circ \cdot \frac{180^\circ}{360^\circ} = 90^\circ.$$

На графике рис. 5 представлены значения коэффициентов в зависимости от угла отсечки, вычисленные по (6); так для $\Theta = 90^\circ$ получаем $\alpha_1 = 0,5$, $\alpha_2 = 0,212$, $\alpha_3 = 0$ и т. п. Такой же результат получим для коэффициентов ряда Фурье, формулы (5).

Таким образом, для определения амплитуды тока для составляющих необходимо соответствующие коэффициенты умножить на амплитуду остроконечного импульса, т. е.

$$\begin{aligned} I_0 &= \alpha_0 I_m \\ I_{m1} &= \alpha_1 I_m \\ I_{m2} &= \alpha_2 I_m \\ &\dots \\ I_{mn} &= \alpha_n I_m. \end{aligned}$$

Как уже отмечалось выше, на выходе балансного усилителя, при питании переменным напряжением, получаем трапецеидальную форму напряжения, амплитуда и угол наклона которой зависят от величины входного сигнала (см. рис. 2). Как известно, функция такого вида представляет значительную трудность при анализе и тем более при расчете. Поэтому в данном расчете используется вышеприве-

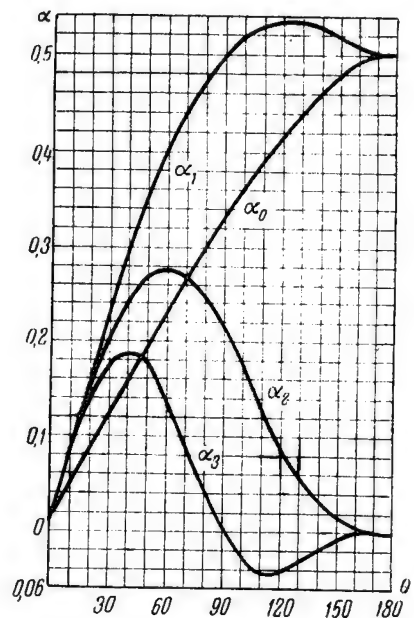


Рис. 5

денный метод разложения подводимого анодного напряжения на гармонические составляющие и последующее выделение первой гармоники.

При этом допускаются следующие приближения:

1. При отклонении угла отсечки от среднего значения на $\Delta\theta^\circ = \pm 1-2^\circ$, можно принять коэффициент формы первой гармоники равным постоянному среднему значению, т. е.

$$\alpha_{cp} \big|_{\theta_{cp} \pm \Delta\theta^\circ} \alpha_1 = \text{const.}$$

2. При тех же условиях считаем, что составляющая первой гармоники одновременно проходит через нуль.

При питании анодной цепи переменным током практически не удается получить постоянное автоматическое смещение на сетке, поэтому схема работает при $u_{g0} = 0$. В общем случае анодные характеристики ламп при $u_{g0} = 0$ в начальной части нелинейны.

Для удобства анализа спрямим характеристику при $u_{g0} = 0$. Получаемое при этом начальное напряжение u_0 называется приведенным анодным напряжением.

На рис. 6 графически представлена работа балансного усилителя. Анодное напряжение можно представить в виде косинусо-

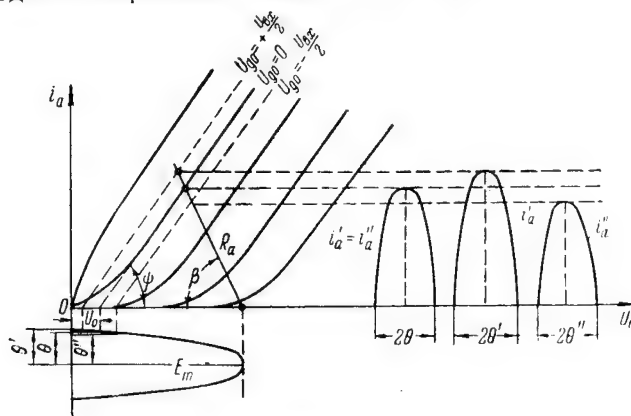


Рис. 6

идального импульса с амплитудой $-E_m$. При отсутствии сигнала на входе в триодах протекают равные по величине токи, при этом считаем, что $R'_a = R''_a = R_a$ и $R'_i = R''_i = R_i$, тогда

$$i'_a = i''_a = \frac{E_m}{R_i + R_a} (\cos \omega t - \cos \Theta), \quad (7)$$

где

$$\cos \Theta = \frac{U_0}{E_m};$$

в данном случае $\cos \omega t = 1$, тогда

$$i'_a = i''_a = \frac{E_m}{R_i + R_a} (1 - \cos \Theta). \quad (8)$$

При подаче на вход сигнала в лампе L_1 , пойдет ток

$$i'_a = \frac{E_m}{R_i + R_a} (1 - \cos \Theta'), \quad (9)$$

$$\text{где } \cos \Theta' = \frac{U_0 + \frac{\mu U_{ax}}{2}}{E_m};$$

в лампе L_2 величина тока будет

$$i''_a = \frac{E_m}{R_i + R_a} (1 - \cos \Theta''), \quad (10)$$

$$\text{где } \cos \Theta'' = \frac{U_0 + \frac{\mu U_{ax}}{2}}{E_m}.$$

Таким образом, в нагрузке возникает результирующий ток первой гармоники

$$i_a = i'_a - i''_a = \frac{E_m \alpha_1'}{R_i + R_a} (1 - \cos \Theta') - \frac{E_m \alpha_1''}{R_i + R_a} (1 - \cos \Theta''). \quad (11)$$

Заменив в (11) $\cos \Theta'$ и $\cos \Theta''$ через их значение и сделав некоторые преобразования, получим

$$i_a = \frac{E_m}{R_i + R_a} \left[\frac{-U_0 \alpha_1' + \frac{\mu \alpha_1' U_{ax}}{2} + U_0 \alpha_1'' + \frac{\mu U_{ax} \alpha_1''}{2}}{E_m} \right];$$

сокращая на E_m и переходя к мгновенным значениям, получим окончательное выражение для i_a в общем виде:

$$i_a = \frac{-U_0 \alpha_1' + \frac{\mu U_{ax} \alpha_1'}{2} + U_0 \alpha_1'' + \frac{\mu U_{ax} \alpha_1''}{2}}{R_i + R_a} \cos \omega t, \quad (12)$$

где α_1' и α_1'' — коэффициенты первой гармоники для углов отсечки Θ' и Θ'' ;

U_{ax} — величина входного напряжения.

При малых сигналах U_{ax} и относительно большом анодном напряжении E_m углы отсечки Θ' и Θ'' отличаются незначительно от Θ_{cp} (0,5—2°), поэтому можно положить

$$\alpha_1' |_{\Theta'} \cong \alpha_1 |_{\Theta_{cp}} \cong \alpha_1'' |_{\Theta''}.$$

На основании этого, из (12) значение тока для первой гармоники

$$i_a = \frac{\mu U_{ax}}{R_i + R_a} \alpha_1 \cos \omega t, \quad (13)$$

и выходное напряжение

$$U_{вых} = i_a R_a = \frac{\mu U_{ax} R_a}{R_i + R_a} \alpha_1 \cos \omega t. \quad (14)$$

По (12) можно также определить величину небаланса, вызываемую высшими четными гармониками. Для этого следует вместо α_1 подставить значения $\alpha_2, \alpha_4, \dots$, соответствующие углам отсечки.

3. Анализ контура связи

На основании схемы рис. 3 цепь связи в модуляторе можно представить в виде схемы рис. 7, где

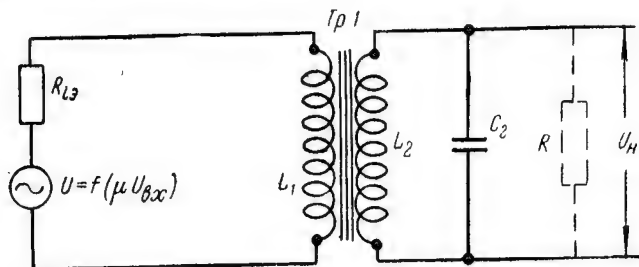


Рис. 7

$$R_{i3} = \frac{2R_i R_a}{R_i + R_a};$$

$$U = U_{вых} = \frac{\mu U_{ax} R_a}{R_i + R_a} \alpha_1 \cos \omega t. \quad (14)$$

Эквивалентная схема рис. 7 для средних частот имеет вид, указанный на рис. 8, где $R'_{i3} = R_{i3} + r_l$;

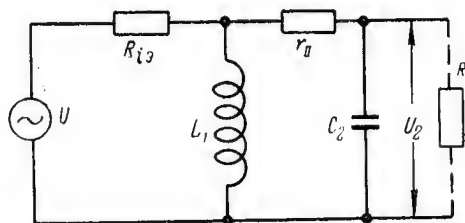


Рис. 8

r'_{II} , C_2 и R' — вторичная цепь трансформатора, приведенная к первичной цепи.

Но так как указанная схема имеет второй частный резонанс, то необходимо в расчете учесть его влияние. Из теории связанных контуров известно [2], что вторичная цепь трансформатора оказывает, в свою очередь, влияние на первичную цепь тем, что ток I_2 индуцирует в первичной цепи противо-э.д.с.

$$\Delta E_1 = 2\pi f I_1 \quad (15)$$

На преодоление ΔE_1 расходуется напряжение ΔU . Условно можно считать, что падение напряжения ΔU возникает на некотором фиктивном сопротивлении ΔZ , называемом вносимым сопротивлением

$$\Delta Z = \frac{\Delta U}{I_1} = \frac{\Delta E_1}{I_1},$$

так как

$$\Delta E_1 = \omega M I_2 = \omega M \frac{\Delta E_1}{Z_2} = \omega M \frac{\omega M I_1}{Z_2},$$

где M — коэффициент взаимной индукции, то

$$\Delta Z = \frac{\Delta E_1}{I_1} = \frac{(\omega M)^2}{Z_2}. \quad (16)$$

Из треугольника сопротивлений определяем выражения для активных и реактивных составляющих вносимого сопротивления

$$\left. \begin{aligned} \Delta r_1 &= \left(\frac{\omega M}{Z_2} \right)^2 r_2; \\ \Delta x_1 &= - \left(\frac{\omega M}{Z_2} \right)^2 x_2. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Таким образом, контур связи можно представить эквивалентной схемой рис. 9. Определяем ток

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{(r_1 + \Delta r_1)^2 + (x_1 + \Delta x_1)^2}} \quad (18)$$

и ток во вторичном контуре

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{E_2}{Z_2} = \frac{\omega M I_1}{Z_2} = \\ &= \frac{\omega M U}{Z_2 \sqrt{(r_1 + \Delta r_1)^2 + (x_1 + \Delta x_1)^2}}. \quad (19) \end{aligned}$$

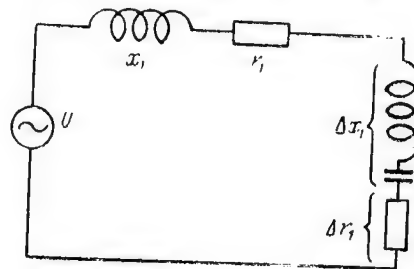


Рис. 9

Известно, что ток I_2 можно выразить через параметры вторичной цепи простой заменой индексов, т. е.

$$I_2 = \frac{\omega MU}{Z_1 \sqrt{(r_2 + \Delta r_2)^2 + (x_2 + \Delta x_2)^2}}. \quad (20)$$

При определенной настройке вторичного контура его реактивное сопротивление x_2 окажется равным и противоположным по знаку, вносимому сопротивлению Δx_2 , т. е.

$$x_2 - \Delta x_2 = x_2 - \left(\frac{\omega M}{Z_1} \right)^2 x_1 = 0.$$

Вторичный ток I_2 достигнет максимума, так как сопротивление вторичной цепи определяется только активной составляющей. Так как при резонансе обычно

$$r_1 \gg x_1 \text{ и } r_2 \gg \Delta r_2,$$

то можно принять

$$Z_1 \approx r_1.$$

Из выражения (20) величина вторичного тока

$$I_2 = \frac{\omega MU}{r_1 r_2}; \quad (21)$$

заменяв в (21) U через (14)

$$U = U_{\text{вых}} = \frac{\rho U_{\text{вх}} R_a}{R_i + R_a} \alpha_1 \cos \omega t,$$

и

$$r_1 = R_{i2} = \frac{2R_i R_a}{R_i + R_a},$$

для I_2 получим

$$I_2 = \frac{\omega M \rho U_{\text{вх}} R_a}{(R_i + R_a) \frac{2R_i R_a}{R_i + R_a} r_2} \alpha_1 \cos \omega t = \frac{\rho}{R_i} \frac{\omega M U_{\text{вх}}}{2r_2} \alpha_1 \cos \omega t;$$

так как

$$S = \frac{\rho}{R_i},$$

то

$$I_2 = S \frac{\omega M U_{\text{вх}}}{2r_2} \alpha_1 \cos \omega t. \quad (22)$$

Чтобы найти выходное напряжение, следует ток I_2 , выражение (22), умножить на выходное сопротивление

$$\rho' = \frac{\rho R}{\rho + R},$$

состоящее из двух параллельно включенных сопротивлений
 ρ — волнового сопротивления контура $L_2 C_2$ и
 R — сопротивления шунта (входное эквивалентное сопротивление следующего каскада, обычно активное).

Для выходного напряжения получим

$$U_2 = S \frac{\omega M \alpha_1 \rho R}{2r_2(\rho + R)} U_{вх} \cos \omega t.$$

Так как $\rho/r_2 = Q$ есть добротность контура, то

$$U_2 = S \frac{\omega M Q \alpha_1 R}{2(\rho + R)} U_{вх} \cos \omega t.$$

Заменим M на ρL_2 , где ρ — степень связи, равная в данном случае коэффициенту трансформации, т. е.

$$\rho = \frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}};$$

тогда

$$U_2 = S \frac{\omega L_2 \rho Q \alpha_1 R}{2(\rho + R)} U_{вх} \cos \omega t.$$

Так как $\omega L_2 = \rho$ и $\rho Q = r_{псз}$, то значение выходного напряжения

$$U_2 = S \frac{r_{псз} \alpha_1 R \rho}{2(\rho + R)} U_{вх} \cos \omega t. \quad (23)$$

Коэффициент усиления модулятора определяется при $\cos \omega t = 1$, как

$$K = \frac{U_2}{U_{вх}} = S \frac{r_{псз} \alpha_1 \rho R}{2(\rho + R)}. \quad (24)$$

Б. РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДУЛЯТОРА

Одним из основных требований при расчете балансного усилителя модулятора является обеспечение стабильной работы во времени и при колебаниях напряжения источников питания.

Известно, что чувствительность модулятора зависит от величины ложного сигнала на выходе схемы и коэффициента усиления, которые связаны зависимостью

$$U_{вх \text{ мин}} = \frac{U_{вых}}{K},$$

где $U_{вых}$ — напряжение на выходе (ложный сигнал), при отсутствии сигнала на входе;

K — коэффициент усиления;

$U_{вх}$ — возможная минимальная величина входного сигнала.

На основании приведенного анализа в дальнейших расчетах определим основные параметры схемы, обеспечивающие поставленные требования.

1. Расчет балансного усилителя

Известно [1], что условием идеальной стабилизации балансного усилителя является равенство параметров триодов, т. е.

$$S' = S'', \quad R'_i = R''_i, \quad S'_f = S''_f.$$

Для уменьшения величины небаланса в случае небольшого изменения параметров триодов желательно иметь $R_a \gg R_i$; так как триоды работают при $U_{g0} = 0$, то желательно, чтобы анодная характеристика при $U_{g0} = 0$ была бы линейна во всем рабочем диапазоне. Кроме того известно, что двойные триоды, с точки зрения эксплуатационных условий, в схемах подобного типа находятся в более выгодном положении, чем триоды выполненные отдельно. На основании высказанных соображений наиболее пригодным оказался двойной триод 6Н2П.

Как показывают экспериментальные исследования и указания некоторых авторов [1] величина напряжения на аноде также влияет на величину небаланса и на стабильность работы модулятора.

В предварительных испытаниях было установлено, что для триода 6Н2П наиболее приемлемое напряжение на аноде лежит в пределах 60—100 в. Приняв $E_a = 130$ в, и выбрав рабочую точку соответствующую $I_{a0} = 1,7$ ма и $U_a = 70$ в, из характеристик 6Н2П находим:

$$R_a = \operatorname{ctg} \beta = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{60}{1,7 \cdot 10^{-3}} = 35 \text{ ком};$$

$$R_i = \operatorname{ctg} \psi = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{60}{1,1 \cdot 10^{-3}} = 54 \text{ ком};$$

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} = \frac{90}{1} = 90; \quad S = \frac{\mu}{R_i} = \frac{90}{54 \cdot 10^3} = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ в}.$$

Сопротивления утечки сетки R'_g и R''_g выбираются из условия обеспечения заданного входного сопротивления. В данной схеме $R'_g = R''_g = 10 \text{ ком}$. Таким образом, входное сопротивление модулятора $R_{вх} \approx 20 \text{ ком}$.

Коэффициент усиления каскада на основании (14) равен

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \alpha_1 \frac{\mu R_a}{R_i + R_a} = 0,49 \frac{90 \cdot 35 \cdot 10^3}{(54 + 35) \cdot 10^3} = 17.$$

В качестве выпрямителя берем двойной диод 6Ц4П. Зная ток нагрузки выпрямителя равный $2I_{ao}$, необходимое анодное напряжение $E_a = 130$ в и определив из динамической характеристики 6Ц4П величину R_i , легко найти величину вторичного напряжения опорного трансформатора $U \cong 132$ в.

2. Расчет контура связи

Контур связи представляет собой трансформатор, вторичная цепь которого для выделения первой гармоники настроена в резонанс на частоту опорного напряжения $f = 400$ гц.

На рис. 9 представлена эквивалентная схема контура связи. Как видно из (24), для получения большего коэффициента усиления необходимо по возможности получить большое значение $r_{рез} = \rho Q$ и ρ (коэффициент трансформации из вторичной цепи в первичную). Так как на практике трудно получить $\rho > 1$, то лучший результат можно было бы получить увеличивая Q , т. е. взять $\omega L_1 \gg R_{iэ}$, но при этом значительно возрастают габариты трансформатора. Поэтому для уменьшения габаритов лучше брать $\omega L_1 < R_{iэ}$.

Определим величину внутреннего сопротивления эквивалентного генератора

$$R_{iэ} = \frac{2R_i R_a}{R_i + R_a} = \frac{2 \cdot 54 \cdot 35 \cdot 10^3}{(54 + 35) \cdot 10^3} = 43 \cdot 10^3 \text{ ом.}$$

Найдем индуктивность первичной обмотки трансформатора; приняв $\omega L_1 = \frac{R_{iэ}}{2}$, получим

$$L_1 = \frac{R_{iэ}}{2\omega} = \frac{43 \cdot 10^3}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^3} = 7,3 \text{ гн,}$$

где $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 400 = 2500$ 1/сек.

Определим число витков первичной обмотки, взяв железо Ш — 20×20 для которого

$$Q_{жс} = F y_1 y_2 = 0,86 \cdot 2 \cdot 2 = 3,6 \text{ см}^2,$$

$$l_{жс} = 10,2 \text{ см,} \quad \mu_d = 400;$$

тогда

$$\omega_1 = 10^4 \sqrt{\frac{l_{жс} L_1}{0,4 \pi \mu_d Q_{жс}}} = 10^4 \sqrt{\frac{10,2 \cdot 7,3}{550 \cdot 3,6}} = 2020 \text{ витков;}$$

принимаем $\omega_1 = 2000$ витков; взяв

$$\rho = 1 = \frac{\omega_1}{\omega_2},$$

получим число витков вторичной обмотки

$$\omega_2 = 2000 \text{ витков.}$$

Из предварительного подсчета было получено, что для полного заполнения окна можно принять для первичной и вторичной обмоток провод ПЭЛ $\varnothing 0,08 \text{ мм}$. Для определения добротности Q контура необходимо определить активное сопротивление вторичной обмотки. Зная число витков вторичной обмотки, диаметр провода, удельное сопротивление меди и среднюю длину витка легко найти сопротивление обмотки. В нашем примере $r_{II} = 2300 \text{ ом}$.

Волновое сопротивление контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega L_2 = 2,5 \cdot 10^3 \cdot 7,3 = 18300 \text{ ом,}$$

тогда добротность контура

$$Q = \frac{\rho}{r_{II}} = \frac{18300}{2300} \approx 9,0.$$

Емкость контура C_2 , вообще говоря, можно рассчитать по известной формуле для резонанса, но вследствие того, что на резонанс вторичного контура оказывает значительное влияние вносимое сопротивление первичной цепи, то лучше C_2 подбирать опытным путем. В данной схеме $C_2 = 0,035 \text{ мкф}$.

Вследствие вносимого сопротивления в контур со стороны первичной цепи, добротность контура уменьшится. Эквивалентную добротность можно определить из эквивалентной схемы трансформаторного контура связи

$$Q_3 = \frac{Q}{1 + \frac{r_{pez}}{R} + \frac{pr_{pez}}{R_{i3}}},$$

где $r_{pez} = Q\rho = 18,3 \cdot 10^3 \cdot 9 \approx 160 \text{ ком}$;

примем $R = 150 \text{ ком}$,

тогда

$$Q_3 = \frac{9}{1 + \frac{160}{150} + \frac{1 \cdot 160}{43}} \approx 1,6.$$

Как и следовало ожидать, вследствие вносимого сопротивления добротность контура значительно уменьшилась.

Общий коэффициент усиления определяется из (24)

$$K = S \frac{r'_{pez} \alpha_1 R p}{2(R + \rho)} = S \frac{\rho Q_3 \alpha_1 R p}{2(R + \rho)} =$$

$$= \frac{1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 18,3 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 0,49 \cdot 150 \cdot 10^3 \cdot 1}{2(150 + 18,3) \cdot 10^3} \approx 11.$$

3. Экспериментальные исследования модулятора

Соответственно схеме рис. 3 и приведенным выше расчетным данным был изготовлен опытный образец модулятора. Приводим данные основных элементов схемы:

$$R_g' = R_g'' = 10 \text{ ком}; R_a' = R_a'' = 33 \text{ ком}; R_a = 3 \text{ ком};$$

$$C_2 = 0,035 \text{ мкф} — \text{подобран в процессе испытания};$$

C' и C'' — служат для получения полной балансировки по первой гармонике и подбираются опытным путем. В данном образце $C' = 0$ и $C'' = 60 \text{ мкмкф}$.

Рекомендуется первичную обмотку $Tr2$ мотать из двух секций со встречной намоткой, после чего соединять начало первой с началом второй секции или же соединять их концы. Благодаря этому, вносимую емкость в схему со стороны трансформатора можно свести к минимуму.

В результате балансировки модулятора с помощью потенциометра R_a и подбором C' и C'' , на выходе схемы, при отсутствии сигнала на входе, напряжение небаланса было получено равным 8—10 мв. Причем напряжение небаланса представляет преимущественно переменное напряжение с частотой $f = 800 \text{ гц}$, т. е. вторую гармонику.

Схема обладает большой чувствительностью к величине входного сигнала. При входном сигнале 1—2 мв модуляция пропорциональная, но с некоторым искажением формы на выходе. При больших входных сигналах (3—50 мв) модулятор обеспечивает требуемую линейность, хорошую форму кривой и имеет коэффициент усиления 10; расчетный коэффициент усиления — 11.

На рис. 10 представлена зависимость $U_{вых} \sim f(U_{вх})$ для следующих данных:

$\pm U_{вх} \text{ мв}$	0	10	20	30	40	50
$U_{вых} \text{ мв}$ ($f=400 \text{ гц}$)	8	100	200	300	400	500.

При сигналах больше 50 мв схема не испытывалась, но есть основания полагать, что можно значительно расширить диапазон модулируемых сигналов.

Модулятор подвергался необходимым испытаниям в отношении стабильности во времени и при колебаниях напряжения источников питания на $\pm 10\%$.

В табл. 1 представлены результаты испытания при колебаниях напряжения источников питания на $\pm 10\%$ при нестабилизированном токе накала и $U_{вх} = 0$.

Таблица 1

№ по порядку	Напряжение источников питания, %		Величина небаланса на выходе, мВ	Примечания
	катод	анода		
1	100	100	8—10	Измерено при испытаниях в течение 8—10 час.
2	110	100	72—90	
3	90	100	100—110	
4	100	110	20—23	
5	100	90	21—23	
6	110	100	12	Стабильно при испытаниях в течение 8—10 час.
7	90	100	11	
8	110	110	21	
9	90	90	20	Стабильно при испытаниях в течение 8—10 час.
10	100	100	8	

Из данных приведенных в табл. 1 следует, что изменение напряжения питания на $\pm 10\%$ в большей степени влияет на вели-

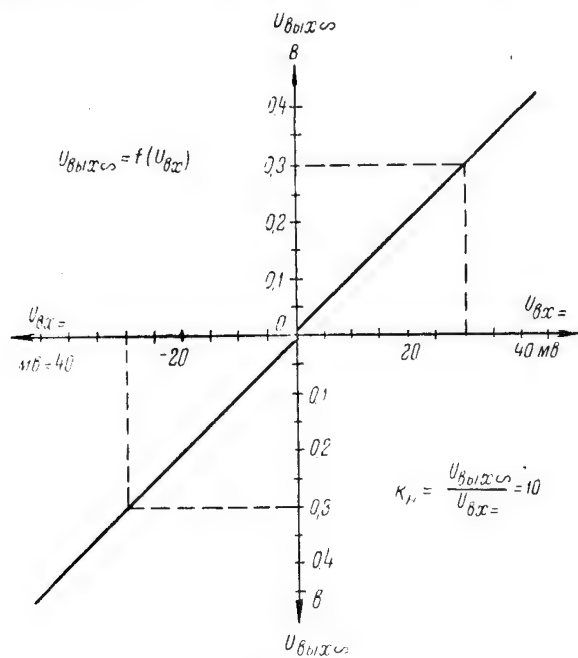


Рис. 10

чину небаланса и практически не влияет на стабильность во времени. Схема наиболее чувствительна к изменению напряжения накала ламп. Для устранения этого явления в схеме предусмотрена стабилизация тока накала лампы 6Н2П с помощью бареттера 0,3Б17-35, благодаря чему изменение напряжения источников питания на $\pm 10\%$ практически не оказывает влияния на работу модулятора (см. пп. 6, 7, 8, 9 табл. 1). Напряжение накала на лампе 6Н2П необходимо установить равным 6 в, так как при пониженном напряжении накала лампа работает более стабильно.

Выводы

1. Произведенный анализ балансного модулятора на триодах с анодным питанием от переменного тока показывает, что модуляторы подобного типа в простейшем исполнении (рис. 1) не обеспечивают модуляцию малых сигналов (0—100 мв), вследствие относительного большого ложного сигнала на выходе (0,5—1,5 в).

2. Схема модулятора (рис. 3) обеспечивает преобразование сигнала в пределах 2,3—50 мв, поэтому она может быть использована в усилителях постоянного тока малых сигналов, в следящих системах с выходом на переменном токе и других устройствах подобного типа.

3. Балансный модулятор, выполненный по схеме рис. 3, стабилен во времени и при колебаниях напряжения источников питания на $\pm 10\%$.

4. Расчет, произведенный методом разложения однополупериодного напряжения на составляющие с последующим выделением первой гармоники, позволяет получить основные соотношения в модуляторе (коэффициент усиления, величину небаланса, минимально-возможный сигнал на входе), а также произвести выбор и расчет основных элементов схемы.

5. Экспериментальные исследования опытного образца модулятора, выполненного согласно расчета, подтверждают расчетные данные: экспериментальный коэффициент усиления по напряжению $K_u = 10$; расчетный коэффициент усиления по напряжению $K_u = 11$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Байда и А. А. Семенович, Электронные усилители постоянного тока, Госэнергоиздат, 1953.
2. Г. В. Войшвилло, Общий курс радиотехники, Воениздат, 1948.
3. З. И. Модель и И. Х. Невяжский, Радиопередающие устройства, Связьиздат, 1949.
4. О. М. Мина и Д. Е. Половников, Об особенности работы усилителя мощности с питанием анодных цепей переменным током, «Автоматика и телемеханика», № 4, 1956.

5. Я. Е. Гукайло и Е. С. Марков, Инженерный метод расчета двух типов демодуляторов, «Автоматика и телемеханика», № 6, 1952.

6. А. Азатьян и С. Толкачева, Применение германиевых диодов типа ДГ-Ц, «Радио», № 6, 1954.

7. Генерирование электрических колебаний специальной формы, II, перевод с английского под редакцией Л. Ю. Блюмберга и Т. Р. Брахмана, Советское радио, 1953.

8. Детали и элементы радиолокационных станций, III, перевод с английского под редакцией А. Я. Брейтбарта, Советское радио, 1953.

Поступила 4/III 1957 г.

*Канд. техн. наук Е. Г. ВОЛКОВ,
Докт. техн. наук, проф. К. И. КРЫЛОВ*

**ФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА МАГНИТНЫМ
ПОЛЕМ, ИСКАЖЕННЫМ В ОБЛАСТИ КАТОДА
ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ТЕЛАМИ**

Введение

До настоящего времени вопрос о возможности формирования сходящихся электронных потоков большой проводимости с помощью магнитного поля еще мало изучен.

В мощных электронно-лучевых приборах для формирования сходящихся электронных пучков обычно используются электростатические фокусирующие устройства. Наличие в приборах этого типа эквипотенциальных участков значительной протяженности вызывает необходимость применения магнитного поля. Назначение магнитного поля при этом сводится к поддержанию постоянства диаметра сформированного потока электронов, исправлению его формы с помощью коротких магнитных линз или к компенсации взаимного расталкивания электронов в потоках несложной конфигурации. В перечисленных случаях наличие магнитного поля в области электростатического устройства является нежелательным фактом. Неблагоприятное его влияние в области катода на электростатическое формирование потока устраняется местной магнитной экранировкой или специальным подбором распределения магнитного поля. Известны также случаи, когда в неэкранированных электронных пушках магнитное поле используется для регулировки сходимости электронного потока. Однако, с точки зрения формирования потока магнитное поле играет здесь лишь вспомогательную роль.

Создание электронно-оптической системы, в которой формирование сходящегося потока электронов обеспечивалось бы главным

образом или только с помощью магнитного поля, представляет несомненный практический интерес, так как решение этой задачи открывает дополнительные возможности при конструировании электронных приборов. В частности, появляется возможность иного взаимного расположения катода и элементов фокусирующей системы. Выполнение фокусирующей системы как конструктивной части вакуумного прибора становится необязательным, ввиду того что при этом она может быть расположена вне вакуумного прибора.

Практически весьма желательно осуществлять формирование (т. е. фокусировку) и поддержание на необходимой длине постоянства диаметра сфокусированного пучка при помощи одного основного соленоида. Весьма ценным явилось бы осуществление фокусировки при любом расположении электронного пучка внутри соленоида, когда ось его параллельна оси симметрии соленоида, но не обязательно с ней совпадает. Однако требования к магнитному полю, с точки зрения его конфигурации, для формирования и удержания сформированного пучка различны. В то время как формирование магнитного поля требует неоднородного осесимметричного поля, для поддержания постоянства диаметра желательно поле однородное.

Второе требование — несовпадение осей симметрии пучка и соленоида, исключает возможность одновременного использования краевого эффекта соленоида для фокусировки и однородного поля внутри соленоида для поддержания постоянства диаметра пучка. Поэтому нами были проведены исследования возможности формирования электронного пучка магнитным полем, искаженным в области катода ферромагнитными телами. Ниже приводятся описание исследований и их результаты.

1. Общие соображения к постановке эксперимента

Основное направление эксперимента состояло в изучении влияния сходящегося магнитного поля на участке, прилегающем к катоду, где поток электронов подвержен действию ускоряющего электрического поля.

Эксперимент был поставлен таким образом, чтобы его результаты максимально приблизить к условиям возможного практического применения.

Последнее обстоятельство потребовало поисков и отбора способов получения сходящегося магнитного поля по признаку их практической пригодности и конструктивных удобств. При этом выбор был остановлен на использовании местных деформаций однородного магнитного поля с помощью ферромагнитных тел.

Возрастание напряженности магнитного поля в промежутке катод-анод и, следовательно, сходимость силовых линий в направ-

лении движения электронов могут быть получены при размещении ферромагнитного элемента с тыльной стороны катода. К важным достоинствам такого способа получения сходящегося магнитного поля можно отнести следующее:

1. Наличие ферромагнитного элемента не препятствует поддержанию сформированного потока электронов с помощью однородного магнитного поля.

2. Благодаря естественному сопряжению однородного и фокусирующего полей исключается их взаимное влияние и, следовательно, необходимость взаимной магнитной экранировки соответствующих участков потока.

3. Ферромагнитный элемент достаточно удален от катода и зоны формирования потока, что способствует понижению рабочей температуры и сохранению магнитных свойств используемого материала.

4. Все элементы конструкции, обеспечивающие формирование и поддержание электронного потока, могут располагаться вне вакуумной оболочки прибора.

Распределение ускоряющего электрического поля было выбрано таким, чтобы оно соответствовало случаю простейшей системы электродов, не имеющей дополнительных устройств для получения электростатической фокусировки. Такому требованию, в частности, удовлетворяет поле плоской системы электродов с анодом в виде диафрагмы, которое характеризуется рассеивающим действием на электронный поток.

Для контроля сходимости и границ формируемого электронного потока была создана модель электронно-оптической системы с анодом в виде нескольких диафрагм последовательно убывающего диаметра расположенных на некотором расстоянии друг от друга.

2. Экспериментальные исследования

А. Получение и исследование магнитного поля необходимой конфигурации и напряженности. В процессе работы были изучены магнитные поля, полученные при использовании ферромагнитных элементов различной конфигурации. Конструкция этих элементов представлена на рис. 1. Изучение поля производилось прежде всего качественно с помощью магнитных опилок, затем более тщательно, — методом электростатической аналогии и, наконец, производились измерения напряженности поля вдоль оси системы баллистическим методом.

Как показали испытания, наиболее благоприятные поля могут быть получены при создании в центральной части вспомогательных ферромагнитных тел магнитодвижущей силы, встречной по отношению к полярности внешнего деформируемого поля. Встреч-

ная м.д.с. осуществлялась путем пропускания тока необходимого направления через обмотку небольшой катушки, расположенной на центральной части ферромагнитного элемента.

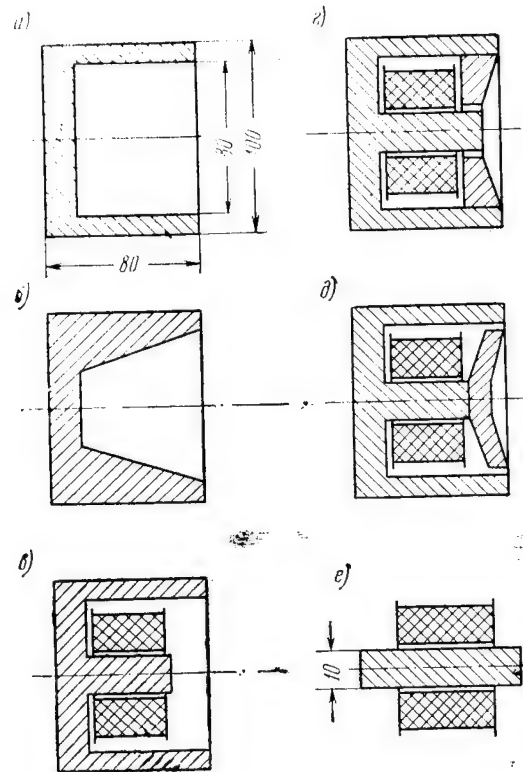


Рис. 1

В этом случае изменение напряженности магнитного поля вдоль оси X имеет характер, показанный на рис. 2, где по оси ординат отложено отношение величины поля H , к недеформированному полю внутри соленоида H_0 .

На рис. 3 представлена зависимость расстояния — X_0 между границей ферромагнитного элемента e и точкой с нулевой напряженностью магнитного поля от соотношения токов основной и размагничивающей катушек. Ввиду того, что это расстояние определяет необходимое удаление ферромагнитного элемента от катода, появляется возможность помещать ферромагнитный элемент

на различных расстояниях, подбирая соответствующие соотношения токов.

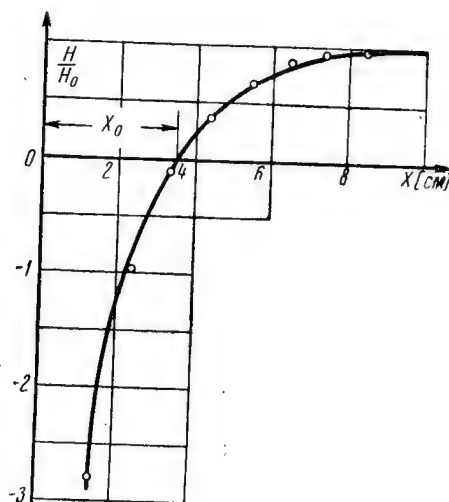


Рис. 2

Как видно из приведенных графиков, сходимость магнитного поля может быть обеспечена даже при значительном удалении от

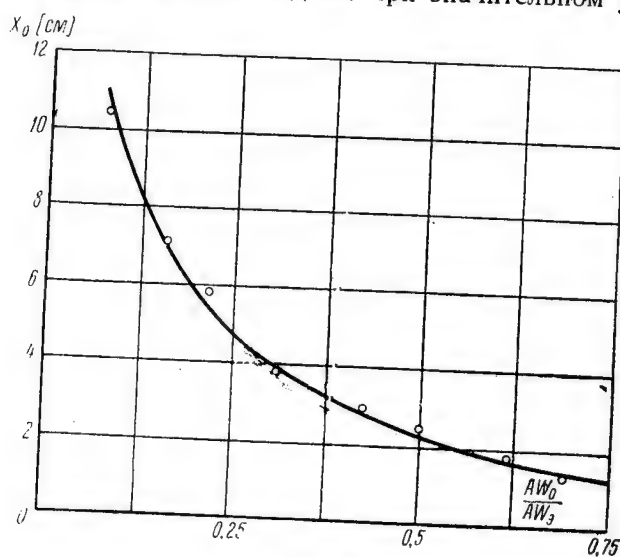
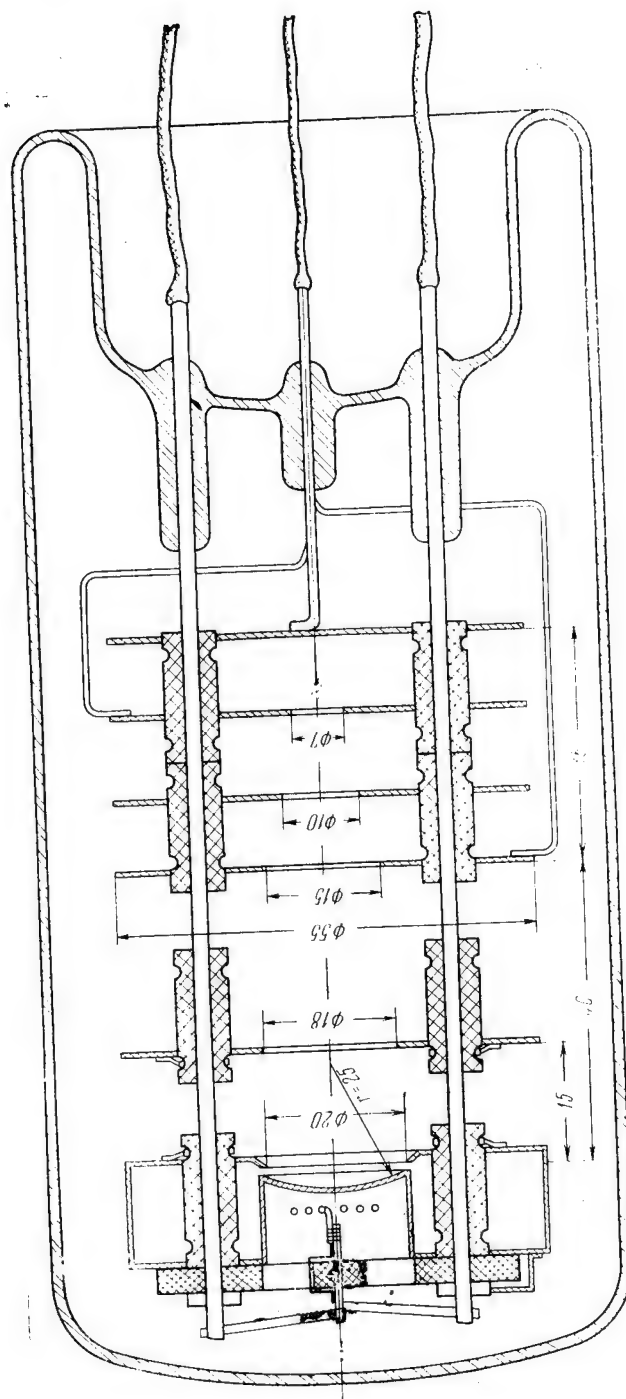


Рис. 3



границ ферромагнитного элемента, что свидетельствует о возможности помещения ферромагнитного элемента на значительном расстоянии за катодом.

Б. Вакуумная часть модели. Вакуумная часть экспериментальной установки изображена на рис. 4. Она включает в себя оксидный подогревный катод торцевого типа и секционированный анод, состоящий из пяти диафрагм, отверстия которых имеют диаметр равный 0,9; 0,75; 0,5; 0,35 диаметра катода. На все секции анода в процессе испытания подается один и тот же потенциал $U_0 = 400 - 500$ в. Отдельные выводы от секций позволяют измерять распределение электронного тока между диафрагмами. Взаимное расположение отдельных элементов модели, монтаж и геометрические размеры указаны на рис. 4. Электрическая схема включения модели показана на рис. 5. Расчетное значение «первианса» модели составляет $G = 3 \cdot 10^{-6} \text{ а/в}^{3/2}$.

Монтаж электродов внутри стеклянного баллона осуществлен таким образом, что ферромагнитный элемент, расположенный вне вакуумной модели, может быть приближен к рабочей поверхности катода на расстояние до 35 мм, что составляет 1,75 диаметра катода.

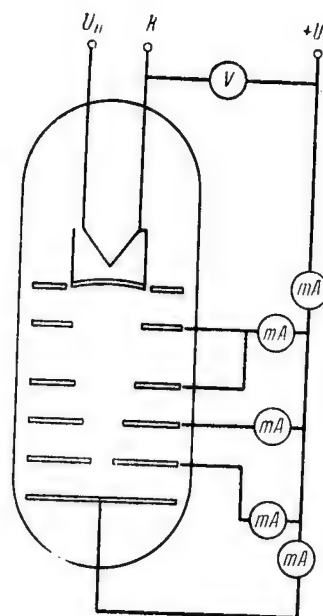


Рис. 5

3. Результаты эксперимента

Исследование зависимости токораспределения в модели от величины м.д.с. магнитных катушек производилось при использовании ферромагнитных элементов d и e , изображенных на рис. 1. Взаимное расположение магнитных катушек, ферромагнитного элемента и вакуумной модели в процессе измерений показано на рис. 6.

На рис. 7 приводятся типичные кривые, показывающие зависимость токопрохождения в модели от м.д.с. размагничивающей катушки AW , ферромагнитного элемента d . Кривые на этом рисунке соответствуют токопрохождению через диафрагмы, диаметр которых составляет $d/d_k = 0,5$ и $d/d_k = 0,35$ диаметра катода.

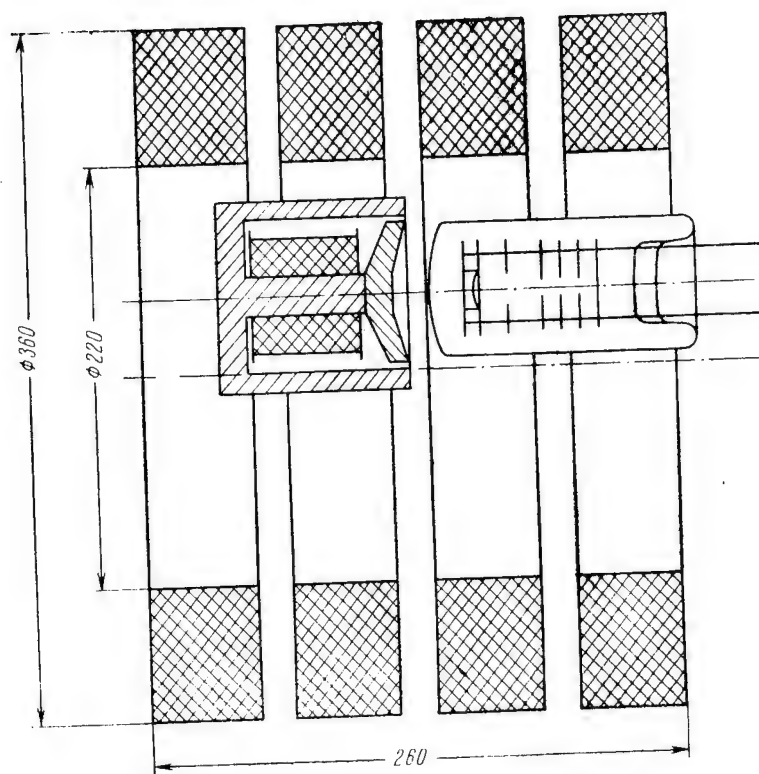


Рис. 6

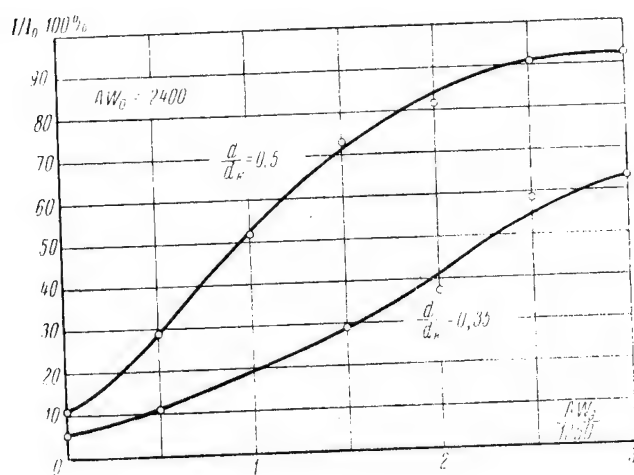


Рис. 7

На рисунках 8 и 9 показаны кривые токораспределения, полученные при изменении м.д.с. элемента AW_3 и м.д.с. внешней катушки AW_0 в случае использования элемента e .

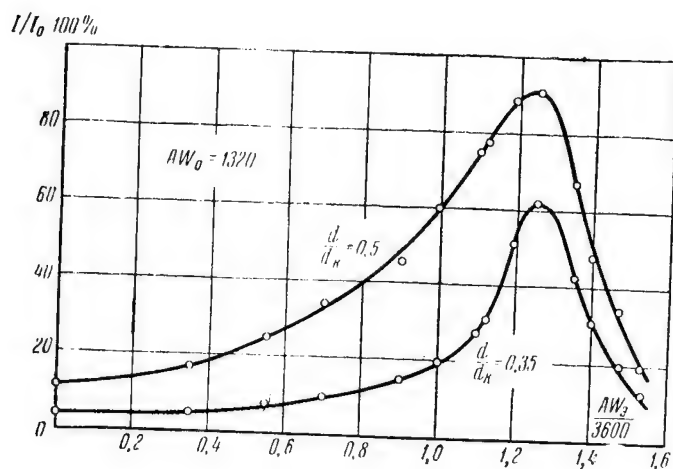


Рис. 8

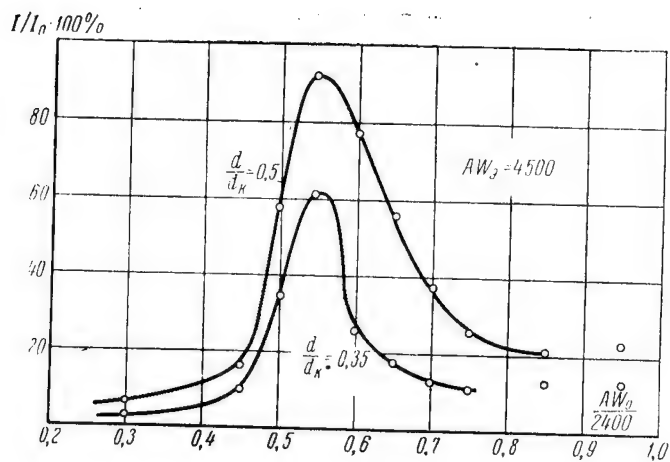


Рис. 9

Выводы

1. Формирование магнитным полем, искаженным в области катода ферромагнитными телами, представляет собой практически разрешимую задачу.

2. В предлагаемом варианте электронно-оптической системы установлена зависимость сходимости электронного потока от напряженности магнитного поля и наличие ее оптимальных значений.

3. Получено двухкратное сжатие электронного потока при токопрохождении более 90 %, и трехкратное — при токопрохождении более 60 %.

4. Установлено, что наибольшее возможное сжатие потока увеличивается с ростом напряженности однородного магнитного поля внешней катушки.

5. Оптимальное соотношение м.д.с. внешней и размагничивающей катушек соответствует нулевой напряженности магнитного поля у эмиттирующей поверхности катода, и потому зависит от расстояния между границей ферромагнитного элемента и катодом.

Проведенные исследования дают также основание ожидать улучшения полученных результатов при дальнейшей разработке рассмотренного метода формирования электронных потоков.

Поступила 20/VI 1957 г.

Канд. техн. наук, доц. А. Л. ИГРИЦКИЙ

ТЕОРИЯ ОДИНОЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ

Одиночная электростатическая линза является одним из основных элементов электростатического электронного микроскопа. Ее свойства определяют качество изображения, разрешающую способность и увеличение прибора.

В данной статье рассматривается приближенный метод расчета одиночной линзы, который позволяет аналитически определить по размерам линз их основные оптические параметры. Учитывая некоторую произвольность допущений, на которых построена теория линзы, были поставлены опыты по проверке выведенных формул. Результаты опытов приводятся ниже.

Одиночная электростатическая линза с основными размерами показана на рис. 1 и состоит из трех тонких диафрагм с круглыми отверстиями. Для вычисления оптических параметров линзы, как известно, достаточно знать траекторию электрона, который входит в линзу параллельно оптической оси. Расчет траектории электрона может быть произведен с помощью основного дифференциального уравнения параксиальной электронной оптики, которое имеет вид [1]

$$4\Phi(z) \frac{d^2r}{dz^2} + 2\Phi'(z) \frac{dr}{dz} + \Phi''(z)r = 0, \quad (1)$$

где $\Phi(z)$ — распределение потенциала вдоль оптической оси линзы.

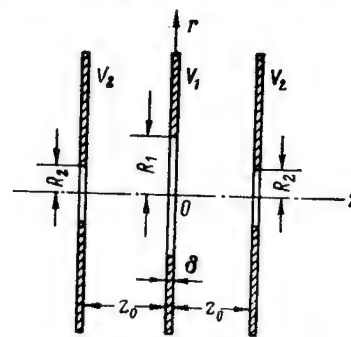


Рис. 1. Схема одиночной электростатической линзы

Из (1) мы видим, что для определения траектории электрона в первую очередь необходимо найти распределение потенциала вдоль оси линзы $\Phi(z)$.

1. Определение распределения потенциала вдоль оптической оси линзы

Строгий теоретический расчет распределения потенциала в линзе на основе уравнения Лапласа является затруднительным. Поэтому была сделана попытка [2, 3] построить функцию $\Phi(z)$ распределения потенциала по оси, которая удовлетворяла бы граничным условиям и в то же время была достаточно точной и простой для возможности ее применения при решении уравнения (1). Для определения функции $\Phi(z)$ решение уравнения Лапласа производится для каждого электрода в отдельности с последующим линейным объединением потенциалов этих электродов¹. Несколько иной приближенный метод расчета распределения потенциала предлагается в работе [4].

Распределение потенциала вдоль оптической оси круглой тонкой диафрагмы, имеющей диаметр отверстия $2R$ и потенциал V_0 , может быть подсчитано по формуле [5]

$$\Phi(z) = V_0 - \frac{E_1 + E_2}{2} z + \frac{R}{\pi} (E_1 - E_2) \left(-\frac{z}{R} \operatorname{arctg} \frac{z}{R} + 1 \right),$$

где E_1 и E_2 — напряженности электрического поля соответственно слева и справа от диафрагмы.

Это выражение для $\Phi(z)$ также можно переписать в виде

$$\Phi(z) = a + bz + cz \operatorname{arctg} \frac{z}{R}. \quad (2)$$

Для одиночной трехэлектродной линзы мы будем предполагать, что потенциал на оси, получающийся в результате совместного воздействия трех электродов, может быть представлен линейной комбинацией потенциалов, наводимых каждым электродом в отдельности. Примем, что $\Phi_1(z)$, $\Phi_2(z)$, $\Phi_3(z)$ — потенциалы на оси, создаваемые соответственно центральным, правым и левым электродами. Тогда согласно (2) получаем:

$$\Phi_1(z) = a_1 + b_1 z + c_1 z \operatorname{arctg} \frac{z}{R_1};$$

$$\Phi_2(z) = a_2 + b_2(z - z_0) + c_2(z - z_0) \operatorname{arctg} \frac{z - z_0}{R_2};$$

$$\Phi_3(z) = a_3 + b_3(z + z_0) + c_3(z + z_0) \operatorname{arctg} \frac{z + z_0}{R_3}.$$

¹ Такое линейное объединение потенциалов является до некоторой степени произвольным и поэтому выведенные формулы нуждаются в экспериментальной проверке.

Линейная комбинация этих трех потенциалов, принимаемая за действительное распределение потенциала вдоль оси трехэлектродной линзы, может быть представлена в виде

$$\Phi(z) = A + Bz + Cz \operatorname{arctg} \frac{z}{R_1} + D(z - z_0) \operatorname{arctg} \frac{z - z_0}{R_2} + \\ + E(z + z_0) \operatorname{arctg} \frac{z + z_0}{R_2}. \quad (3)$$

Постоянные коэффициенты A, B, C, D, E определяются из вида функции $\Phi(z)$. Линза является симметричной относительно плоскости $z = 0$. Поэтому функция $\Phi(z)$ будет четной. Из условия четности мы получаем, что $B = 0$ и $D = E$. С другой стороны $\Phi(z)$ в бесконечности должна оставаться постоянной, так как в бесконечности поля нет. Из этого условия следует, что $C = -2D$.

Таким образом, (3) содержит всего лишь две произвольные постоянные, которые мы обозначим через a и b

$$\Phi(z) = a + b \left[(z + z_0) \operatorname{arctg} \frac{z + z_0}{R_1} + (z - z_0) \operatorname{arctg} \frac{z - z_0}{R_2} - 2z \operatorname{arctg} \frac{z}{R_1} \right]. \quad (4)$$

Для определения коэффициентов a и b примем, что переменной в (4) является не величина z , а R_1 . Другими словами, можно рассматривать серию линз, у которых центральный электрод имеет переменный диаметр $2R_1$. Для малых значений R_1

$$\operatorname{arctg} \frac{z}{R_1} = \frac{\pi}{2} - \frac{R_1}{z}. \quad (5)$$

С учетом (5), в пределе для центрального электрода на основании (4) можно написать ($z \rightarrow 0$, R_1 мало)

$$V_1 = a + 2b \left(z_0 \operatorname{arctg} \frac{z_0}{R_2} + R_1 \right). \quad (6)$$

Совершенно аналогично для правого внешнего электрода имеем

$$V_2 = a + b \left(2z_0 \operatorname{arctg} \frac{2z_0}{R_2} - 2z_0 \operatorname{arctg} \frac{z_0}{R_1} - R_2 \right). \quad (7)$$

Из (6) и (7)

$$a = V_1 - 2b \left(R_1 + z_0 \operatorname{arctg} \frac{z_0}{R_2} \right); \quad (8)$$

$$b = - (V_2 - V_1) \left[2R_1 + 2z_0 \operatorname{arctg} \frac{z_0}{R_2} - 2z_0 \operatorname{arctg} \frac{2z_0}{R_2} + \right. \\ \left. + 2z_0 \operatorname{arctg} \frac{z_0}{R_1} + R_2 \right]^{-1}. \quad (9)$$

Таким образом (4), (8) и (9) полностью определяют распределение потенциала в зависимости от геометрических размеров линзы и потенциалов на электродах. На практике очень часто $\frac{z_0}{R_2} \gg 3$. В этом случае можно заменить

$$\operatorname{arctg} \frac{z_0}{R_2} = \frac{\pi}{2} - \frac{R_2}{z_0}$$

и формула для b принимает более простой вид

$$b = - \frac{V_2 - V_1}{2R_1 + 2z_0 \operatorname{arctg} \frac{z_0}{R_1}}. \quad (9a)$$

Как мы увидим в дальнейшем, на параметры линзы в сильной степени влияет потенциал в центре среднего электрода и в центре внешних электродов. Полагая в (4) $z = 0$, с учетом (8) и (9a), получим

$$\Phi(0) = V_1 + \frac{V_2 - V_1}{1 + \frac{z_0}{R_1} \operatorname{arctg} \frac{z_0}{R_1}}. \quad (10)$$

Чтобы определить потенциал в центре внешних электродов, в (4) полагаем $z = z_0$ и с учетом (8) и (9a) получим

$$\Phi(z_0) = V_1 + (V_2 - V_1) \left[1 - \frac{\frac{R_2}{2R_1}}{1 + \frac{z_0}{R_1} \operatorname{arctg} \frac{z_0}{R_1}} \right]. \quad (11)$$

На рис. 2 приведена кривая распределения потенциала вдоль оси (сплошная линия), построенная по (4) для линзы, показанной на рис. 1. Эта кривая обнаруживает параболический характер изменения вблизи начала координат и наличие двух точек перегиба. Действительно, (4) вблизи от начала координат при малых z можно записать в виде

$$\Phi(z) = a + b \left[2z_0 \operatorname{arctg} \frac{z_0}{R_2} - \frac{2z^2}{R_1} \right] = A + Bz^2. \quad (12)$$

Чтобы найти точки перегиба в кривой распределения потенциала, необходимо приравнять нулю вторую производную от (4) $\Phi''(z) = 0$. Тогда получим

$$\frac{R_2^3}{[R_2^2 + (z + z_0)^2]^2} + \frac{R_2^3}{[R_2^2 + (z - z_0)^2]^2} - \frac{2R_1^3}{(R_1^2 + z^2)^2} = 0.$$

Обычно точки перегиба имеют место вдали от начала координат и поэтому для упрощения вычислений можно пренебречь первым членом по сравнению со вторым, тогда

$$\frac{R_2^3}{|R_2^2 + (z - z_0)^2|^2} = \frac{2R_1^3}{(R_1^2 + z^2)^2}. \quad (13)$$

Задаваясь отношением $\frac{R_2}{R_1}$, из (13) можно вычислить координаты точек перегиба. Например, при $\frac{R_2}{R_1} = 0,5$ координаты точек

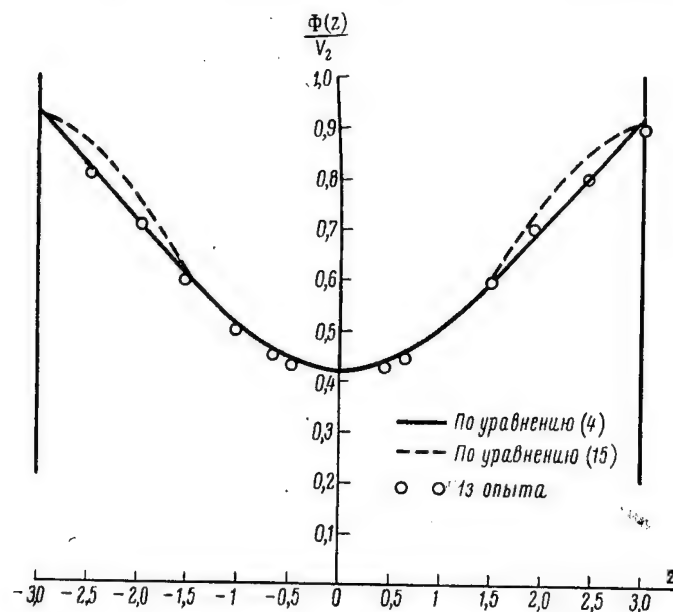


Рис. 2. Распределение потенциала вдоль оптической оси для одиночной электростатической линзы с тонким средним электродом

(Размеры линзы: $R_1=2,1$ мм; $R_2=1$ мм; $z_0=3$ мм; $\delta=0,1$ мм; $V_1=0$; $V_2=1$)

перегиба будут $z_n = \pm \frac{2}{3} z_0$. Расчеты показывают, что это соотношение приблизительно соблюдается во всех практических случаях.

2. Представление кривой распределения потенциала в виде парабол

Выражение (4), представляющее распределение потенциала по оси линзы, является довольно сложным и не может быть исполь-

зовано при интегрировании уравнений электронных траекторий. Исходя из этого действительная кривая распределения потенциала заменяется отрезками трех парабол. При этой замене следует обеспечить наиболее близкое совпадение действительной кривой и параболы в центральной области, так как здесь электроны имеют малую скорость и, следовательно, особенно чувствительны к воздействию электрического поля. Выше было показано, что в центральной области распределение потенциала может быть достаточно точно выражено параболой, представляемой (12). По аналогии, для областей входа и выхода можно принять, что распределение потенциала подчиняется параболическому закону

$$\Phi(z) = C \pm D(z \pm z_0)^2. \quad (14)$$

Коэффициенты A , B , C и D в (12) и (14) определяются из соотношений $A = \Phi(0)$, $C = \Phi(z_0)$, а также из условий непрерывности кривой потенциала и его производной в точках сочленения парабол $z_n = \pm \frac{2}{3} z_0$. В итоге кривую распределения потенциала, представляемую (4), можно заменить следующими тремя параболлами;

$$\left. \begin{aligned} \text{область входа: } z_0 < z \leq -\frac{2}{3} z_0 \quad \Phi(z) &= \Phi(z_0) - 2n(z + z_0)^2; \\ \text{центральная область: } -\frac{2}{3} z_0 < z < +\frac{2}{3} z_0 \quad \Phi(z) &= \Phi(0) + nz^2; \\ \text{область выхода: } \frac{2}{3} z_0 < z < z_0 \quad \Phi(z) &= \Phi(z_0) - 2n(z - z_0)^2, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где

$$n = \frac{3}{2} \frac{\Phi(z_0) - \Phi(0)}{z_0^2}. \quad (15a)$$

Величины $\Phi(0)$ и $\Phi(z_0)$ определяются (10) и (11).

На рис. 2 построены кривые изменения потенциала вдоль оси линзы по (4) и (15). Мы видим, что в центральной области имеется хорошее совпадение кривых. Заметное расхождение наблюдается лишь в краевых областях, где электроны имеют повышенную скорость и поле на них оказывает лишь слабое воздействие.

3. Расчет траекторий электронов

Зная распределение потенциала вдоль оси линзы, можно перейти к расчету траекторий электронов. Расчет траекторий производится с помощью (1). Применим его последовательно к трем различным областям.

В области входа потенциал $\Phi(z)$ меняется по закону, определяемому уравнением (15,1). Вычисляя производные $\Phi'(z)$ и

$\Phi''(z)$ и подставляя их значения в уравнение (1), получим

$$[\Phi(z_0) - 2n(z + z_0)^2] \frac{d^2 r}{dz^2} - 8n(z + z_0) \frac{dr}{dz} - 4nr = 0.$$

Полагая

$$z + z_0 = \xi \text{ и } \frac{2n}{\Phi(z_0)} = \beta^2, \quad (16)$$

получим

$$(1 - \beta^2 \xi^2) \frac{d^2 r}{d\xi^2} - \beta^2 \xi \frac{dr}{d\xi} - \frac{\beta^2}{2} r = 0. \quad (17)$$

Произведем замену переменной, обозначив

$$\beta \xi = \sin \beta u; \quad (18)$$

тогда уравнение (17) примет вид

$$\frac{d^2 r}{du^2} - \frac{\beta^2}{2} r = 0. \quad (19)$$

Решение этого уравнения будет¹

$$r = C_1 \frac{\text{sh}}{\text{ch}} \left(\frac{\beta}{\sqrt{2}} u + C_2 \right), \quad (20)$$

или с учетом уравнения (18)

$$r = C_1 \frac{\text{sh}}{\text{ch}} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \arcsin \beta(z + z_0) + C_2 \right]. \quad (20a)$$

В дальнейшем нам необходимо будет знать уравнение луча, который входит в линзу параллельно оптической оси. Уравнение этого луча должно удовлетворять следующим граничным условиям: при $z = -z_0$, $r = r_0$ и $\frac{dr}{dz} = 0$.

Принимая, что $r = C_1 \frac{\text{sh}}{\text{ch}} \left(\frac{\beta}{\sqrt{2}} u + C_2 \right)$ и определяя C_1 и C_2 из граничных условий, мы получим в итоге

$$r = r_0 \frac{\text{ch}}{\text{sh}} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \arcsin \beta(z + z_0) \right]. \quad (21)$$

В центральной области потенциал меняется по закону, определяемому уравнением (15,2). Вычисляя производные $\Phi'(z)$ и $\Phi''(z)$ и подставляя их значения в уравнение (1), получим

$$4[\Phi(0) + nz^2] \frac{d^2 r}{dz^2} + 4nz \frac{dr}{dz} + 2nr = 0.$$

¹ В зависимости от величины постоянных может быть sh или ch.

Обозначая

$$\frac{n}{\Phi(0)} = \alpha^2 \quad (22)$$

и вводя замену переменной

$$\alpha z = \operatorname{sh} \alpha \xi, \quad (23)$$

получим следующее дифференциальное уравнение для определения r

$$\frac{d^2 r}{d\xi^2} + \frac{\alpha^2}{2} r = 0. \quad (24)$$

Общее решение этого уравнения, как известно, имеет вид

$$r = A \cos\left(\frac{\alpha}{\sqrt{2}} \xi - \varphi\right),$$

или с учетом (23)

$$r = A \cos\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{arc sh} \alpha z - \varphi\right), \quad (25)$$

где A и φ — произвольные постоянные интегрирования.

Уравнение траектории для области выхода получается из уравнения (20а) траектории для области входа, если в нем $(z + z_0)$ заменить на $(z - z_0)$

$$r = B \operatorname{ch} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{arc sh} \beta(z - z_0) - \psi \right]. \quad (26)$$

Здесь B и ψ — произвольные постоянные интегрирования.

Таким образом, траектория параксиального электрона в одинарной линзе определяется системой уравнений (21), (25) и (26). В уравнениях траектории для центральной области и области выхода неизвестны коэффициенты A , φ , B и ψ . Вычисление этих коэффициентов производится из условия непрерывности траектории и ее производной в точках $z_n = \pm \frac{2}{3} z_0$. Для коэффициентов получаются следующие формулы:

$$A^2 = r_0^2 (1 + 3 \operatorname{sh}^2 \beta_0); \quad (27)$$

$$\varphi = \operatorname{arc tg}(\sqrt{2} \operatorname{th} \beta_0) - \alpha_0; \quad (28)$$

$$B^2 = A^2 \left[1 - \frac{3}{2} \sin^2(\alpha_0 - \varphi) \right]; \quad (29)$$

$$\psi = \operatorname{arcth} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{tg}(\alpha_0 - \varphi) \right] - \beta_0, \quad (30)$$

где

$$\beta_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \arcsin \sqrt{\frac{1-x}{3}}; \quad \alpha_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{arcsinh} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{1-x}{x}}; \quad (31)$$

$$x = \frac{\Phi(0)}{\Phi(z_0)}. \quad (32)$$

Очевидно, что (30) имеет смысл только в том случае, если

$$|k| = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{tg}(\alpha_0 - \varphi) \right| < 1. \quad (33)$$

Если $k > 1$, то в уравнении (26) нужно принять нижний символ [sh] и для коэффициентов B и ψ получатся следующие выражения:

$$B^2 = A^2 \left[\frac{3}{2} \sin^2(\alpha_0 - \varphi) - 1 \right]; \quad (34)$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \sqrt{2} \operatorname{ctg}(\alpha_0 - \varphi) - \beta_0. \quad (35)$$

4. Расчет оптических параметров линзы

Если известно уравнение траектории электрона, который входит в линзу параллельно оптической оси, то расчет оптических параметров линзы может быть произведен без особого труда.

Как видно из рис. 3, фокусное расстояние в пространстве изображений определяется соотношением [4]

$$f_1 = - \frac{r_0}{\left(\frac{dr}{dz} \right)_{z=z_{f_1}}} = - \frac{r_0}{\left(\frac{dr}{dz} \right)_{z=z_0'}}, \quad (36)$$

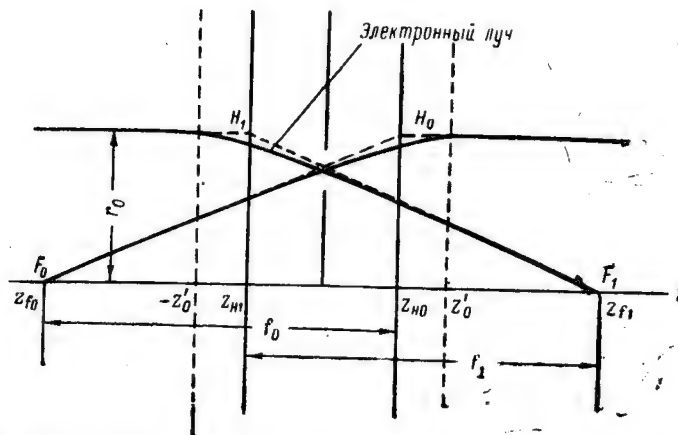


Рис. 3. Определение положения кардинальных точек оптической системы

где z_{f_1} — координата точки фокуса в пространстве изображений;
 z_0' — положение границы поля линзы.

В нашем случае, учитывая малый диаметр отверстий в крайних электродах линзы, принимается, что поле ограничено крайними электродами, т. е. $z_0' = z_0$. При $k < 1$ луч на выходе из линзы определяется уравнением

$$r = B \operatorname{ch} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{arcsin} \beta (z - z_0) - \psi \right].$$

Беря производную от этого уравнения по z и подставляя ее значение в (36), получим

$$f = \frac{\sqrt{2} r_0}{B \beta \operatorname{sh} \psi}. \quad (37)$$

Подставляя значения величин в эту формулу из (29), (16) и (30), после ряда тригонометрических преобразований получим следующее выражение для фокусного расстояния одиночной линзы

$$\frac{1}{f} = \beta \left(\frac{3}{2} \operatorname{ch}^2 \beta_0 - 1 \right) \sin \left(2\alpha_0 - \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{2} \operatorname{th} \beta_0}{1 - 2 \operatorname{th}^2 \beta_0} \right). \quad (38)$$

Эта формула оказывается справедливой также и для значений $k \geq 1$. Положение точки фокуса может быть определено из соотношения (см. рис. 3)

$$z_{f_1} = z_0' - \frac{r(z_0')}{\left(\frac{dr}{dz} \right)_{z=z_0'}}; \quad (39)$$

в случае $k < 1$ — из соотношения (26)

$$r(z_0) = B \operatorname{ch} \psi.$$

Вычисляя значение производной $\left(\frac{dr}{dz} \right)_{z=z_0}$ и подставляя ее значение в (39), получим

$$z_{f_1} = z_0 + \frac{\sqrt{2}}{\beta} \operatorname{cth} \psi.$$

Используя (30) и (28), после ряда тригонометрических преобразований получим

$$\frac{z_{f_1}}{z_0} = 1 + \frac{1}{\beta \cdot 6(1-x)} \cdot \frac{\sqrt{9 \operatorname{ch}^2 2\beta_0 - 1}}{3 \operatorname{ch}^2 \beta_0 - 2} \cdot \frac{\sin(2\alpha_0 + \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{2} \operatorname{cth} 2\beta_0}{1 - 2 \operatorname{th}^2 \beta_0})}{\sin \left(2\alpha_0 - \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{2} \operatorname{th} \beta_0}{1 - 2 \operatorname{th}^2 \beta_0} \right)}. \quad (40)$$

Эта формула оказывается справедливой и при $k > 1$. Зная положение точки фокуса и величину фокусного расстояния, без особого труда можно определить положение главной плоскости. Согласно рис. 3

$$z_{H1} = z_{f1} - f_1. \quad (41)$$

5. Расчет линзы с толстым центральным электродом

Совершенно аналогичным образом может быть рассмотрена линза с толстым центральным электродом, показанная на рис. 4. Чтобы определить распределение потенциала по оси, линза заменяется системой из четырех тонких диафрагм: две внешние диафрагмы совпадают с крайними электродами и две внутренние диафрагмы совпадают с наружными поверхностями центрального электрода. Потенциал по оси линзы образуется в результате линейного объединения потенциалов, наводимых каждым электродом независимо друг от друга. При таких условиях

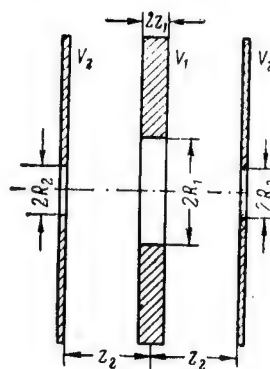


Рис. 4. Трехэлектродная линза с толстым центральным электродом

$$\begin{aligned} \Phi(z) = & a + b \left[(z + z_2) \operatorname{arctg} \frac{z + z_2}{R_2} + \right. \\ & + (z - z_2) \operatorname{arctg} \frac{z - z_2}{R_2} - (z + z_1) \operatorname{arctg} \frac{z + z_1}{R_1} - \\ & \left. - (z - z_1) \operatorname{arctg} \frac{z - z_1}{R_1} \right]. \end{aligned} \quad (42)$$

Если принять $\frac{z_2 - z_1}{R_2} \gg 3$ (случай наиболее распространенный на практике), то для a и b могут быть даны следующие выражения:

$$a = V_1 + (V_2 - V_1) \frac{2R_1 - 2R_2 + \pi(z_2 - z_1)}{2R_1 - \pi z_1 + F(z_1, z_2, R_1, R_2)}; \quad (42a)$$

$$b = - (V_2 - V_1) \frac{1}{2R_1 - \pi z_1 + F(z_1, z_2, R_1, R_2)}, \quad (42б)$$

где

$$F(z_1, z_2, R_1, R_2) = (z_1 + z_2) \operatorname{arctg} \frac{z_1 + z_2}{R_2} + (z_2 - z_1) \operatorname{arctg} \frac{z_2 - z_1}{R_1}. \quad (42в)$$

На рис. 5 сплошная кривая показывает изменение потенциала по оси линзы, вычисленное по (42).

Анализ показывает, что оптические параметры линзы с толстым средним электродом определяются особенно просто, если

$\frac{z_1}{R_1} < 1$. В этом случае оказывается возможным пользоваться формулами, выведенными для линзы с тонкими электродами.

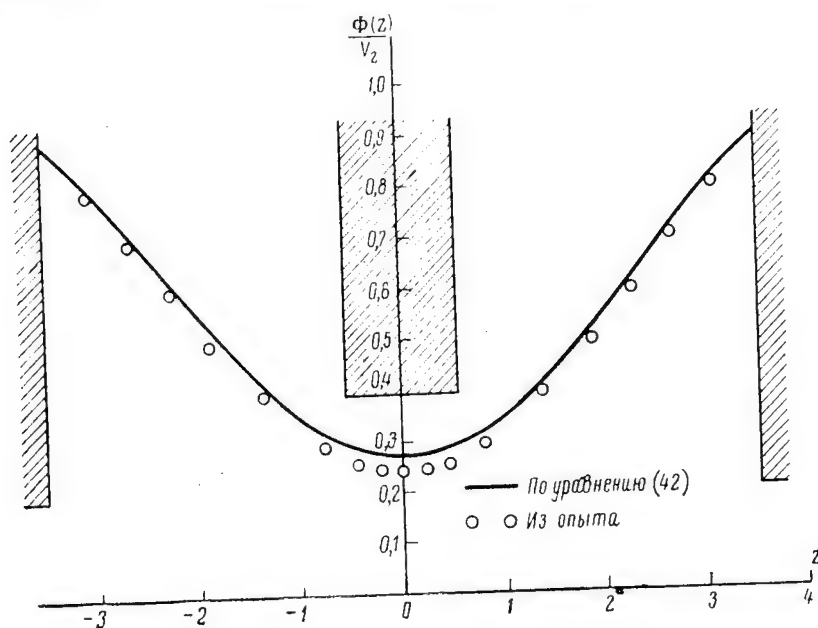


Рис. 5. Распределение потенциала вдоль оптической оси для одиночной электростатической линзы с толстым средним электродом
(Размеры линзы: $R_1=2,1$ мм; $R_2=1$ мм; $2z_1=1,1$ мм; $2z_2=7,1$ мм; $\delta=1$ мм)

Отличие состоит лишь в том, что

$$x = \frac{\Phi(0)}{\Phi(z_2)}, \quad (43)$$

где

$$\Phi(0) = V_1 + (V_2 - V_1) \frac{2R_1 + 2z_1 \operatorname{arctg} \frac{z_1}{R_1} - \pi z_1}{2R_1 - \pi z_1 + F(z_1, z_2, R_1, R_2)}; \quad (44)$$

$$\Phi(z_2) = V_1 + (V_2 - V_1) \left[1 - \frac{R_2}{2R_1 - \pi z_1 + F(z_1, z_2, R_1, R_2)} \right]. \quad (45)$$

Величина $F(z_1, z_2, R_1, R_2)$ определяется уравнением (42в).

6. Экспериментальная проверка теории

Для проверки вышеизложенной теории было изготовлено несколько электростатических линз как с тонким, так и с толстым

центральным электродом. Электроды линз изготавливались из хромоникелевой стали. Для увеличения электрической прочности поверхности электродов полировались. Одна из линз показана на рис. 6.

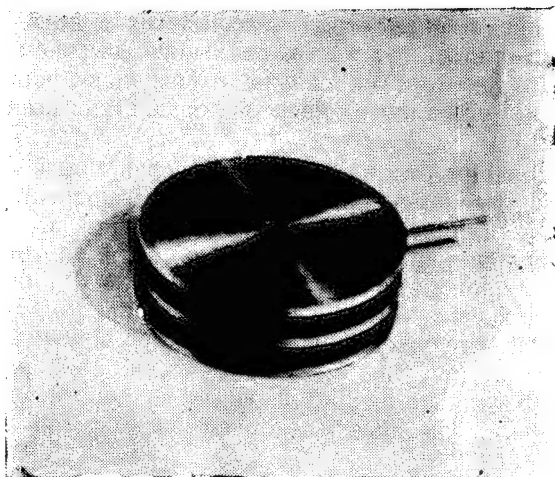


Рис. 6. Одиночная электростатическая линза

Определение распределения потенциала в линзах производилось на макетах в электролитической ванне. С помощью картины поля в каждом случае определялось распределение потенциала вдоль оптической оси линзы. Значения потенциалов, полученные в результате измерений на ванне, нанесены на рис. 2 и 5. Там же указаны основные размеры исследуемых линз. Мы видим, что опытные значения незначительно отличаются от расчетных. В случае линзы с тонким центральным электродом опытная и расчетная кривые распределения потенциала совпадают с точностью до 2,5%. В случае линзы с толстым средним электродом максимальное расхождение между опытом и расчетом получается в центре среднего электрода и составляет 8%.

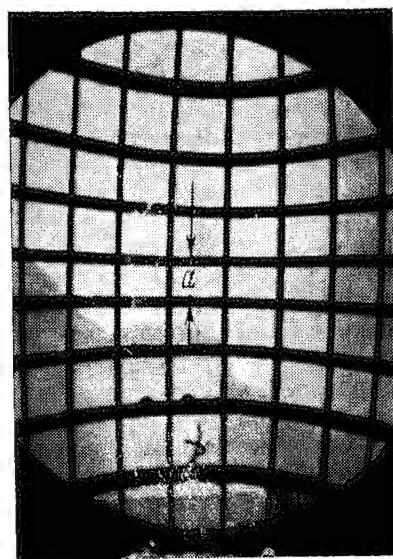
Экспериментальное определение оптических параметров линз производилось на электронно-оптической скамье, устройство которой показано на рис. 7. В стеклянном корпусе 1 скамьи помещается электронная пушка, состоящая из катода 2, управляющего электрода 3 и анода 4. Высокое напряжение ~ 10 кВ подается на анод пушки, катод находится под потенциалом земли; на управляющий электрод может быть подано небольшое отрицательное смещение порядка 100—200 в по отношению к катоду. Катод пушки можно передвигать вдоль оптической оси и перпен-

дикулярно к ней для юстировки с помощью трех винтов. Изолятор 5 обеспечивает изоляцию катода и управляющего электрода на 10 кВ от анода. На фиксированном расстоянии от анода в том же металлическом стакане помещается одиночная электростатическая линза 6. Крайние электроды линзы имеют потенциал анода пушки, а средний электрод соединяется с катодом. Питание схемы осуществлялось от высоковольтного высокочастотного выпрямителя. Внутри корпуса скамьи с помощью форвакуумного и диффузионного масляного насосов создается высокий вакуум $\sim 10^{-5}$ мм.

Для определения оптических параметров линз был применен с некоторыми видоизменениями метод, рассмотренный в литературе [1, 6]. Металлическая сетка 7, состоящая из параллельных проволок, устанавливается между пушкой и линзой, причем ее проволоки расположены горизонтально. Сетка 8 с более крупным шагом располагается за линзой и ее проволоки расположены вертикально. На флуоресцирующем экране электроннооптической скамьи при этом получают теневые изображения сеток 7 и 8, подобные приведенным на рис. 8. Измеряя действительные размеры сеток 7 и 8 с помощью светового микроскопа с окулярным



(a)



(б)

Рис. 8. Изображение сеток электронно-оптической скамьи на флуоресцирующем экране

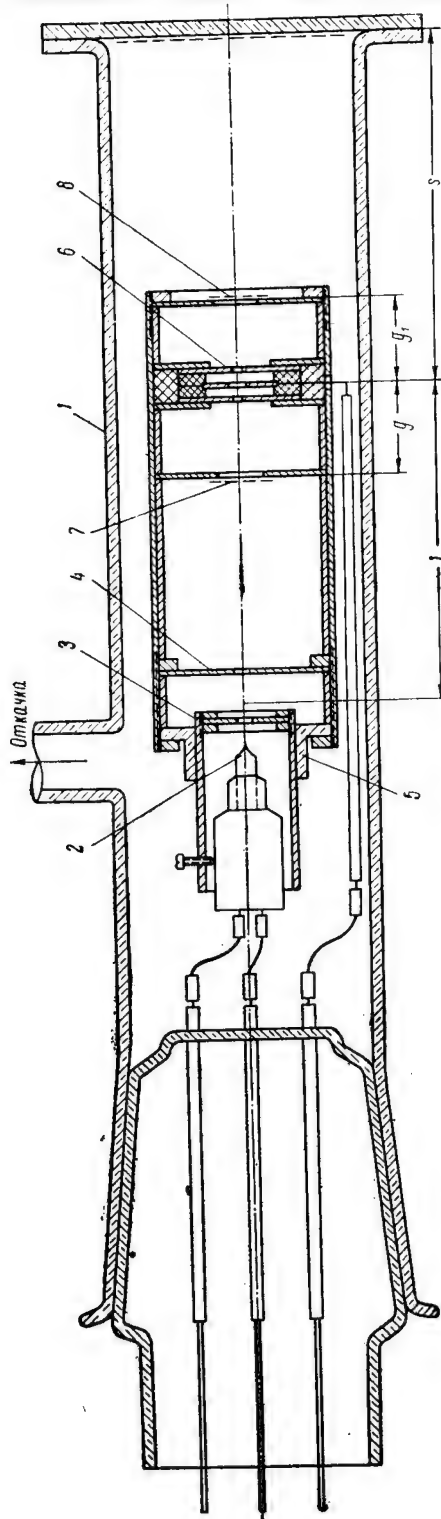


Рис. 7. Электронно-оптическая скамья с установленной электростатической линзой

микрометром и размеры их изображений на экране, можно вычислить увеличение M сетки 7 и увеличение M_1 сетки 8

$$M = \frac{y'}{y}; \quad M_1 = \frac{y'_1}{y_1}, \quad (46)$$

где y', y'_1 — шаг сеток 7 и 8 на флуоресцирующем экране;
 y, y_1 — действительный шаг сеток 7 и 8.

Фокусное расстояние f линзы и расстояние Δ между ее главными плоскостями в рассматриваемом случае определяются по формулам [6]:

$$f = \frac{M(l-p)(l-g)(s-p)}{M^2(l-g)^2 - (s-p)^2} \quad (47)$$

$$\Delta = 2l - 2f \left(1 + M \frac{l-g}{s-p} \right), \quad (48)$$

где

$$p = \frac{M_1 g_1 - s}{M_1 - 1}.$$

Увеличения M и M_1 определяются по (46). Остальные обозначения ясны из рис. 7.

Сопоставление расчета с опытом производилось для линз с тонким и толстым средним электродами. Так, например, картина, приведенная на рис. 8а, была получена для линзы с толстым средним электродом, которая имела следующие размеры (см. рис. 4): $R_1 = 1$ мм, $R_2 = 1$ мм, $z_1 = 0,5$ мм и $z_2 = 3,5$ мм. Теоретически оптические параметры этой линзы определились по (43), (38), (40) и (41). В результате расчета фокусное расстояние получилось равным $f = 2,9$ мм и расстояние между главными плоскостями $\Delta = 2z_{n1} = 2,45$ мм. Экспериментальное определение оптических параметров линзы производилось на электроннооптической скамье. В результате подсчета по (47) и (48) фокусное расстояние получилось равным $f = 2,6$ мм и расстояние между главными плоскостями $\Delta = 2$ мм. Также было проведено экспериментальное исследование линзы с толстым средним электродом, размеры которой указаны на рис. 5. Теоретический подсчет оптических параметров этой линзы дал следующие результаты: $f = 7,7$ мм, $\Delta = 2,7$ мм. Картина, полученная на экране электроннооптической скамьи для этой линзы показана на рис. 8б. Как нетрудно видеть, изображение сетки на экране искажено. Объясняется это тем, что в создании изображения участвуют непараксиальные лучи. Наилучшее приближение к параксиальности, очевидно, дает центральный квадрат, поэтому расчет увеличения линзы производился исходя из размера a — центральной ячейки.

Экспериментально для рассматриваемой линзы было получено $f = 6,6 \text{ мм}$, $\Delta = 2,2 \text{ мм}$. Размеры исследованной линзы с тонким средним электродом указаны на рис. 2. По расчету фокусное расстояние этой линзы получилось равным $11,1 \text{ мм}$, а из опыта $f = 9,9 \text{ мм}$. Были исследованы и некоторые другие линзы.

Выводы

Мы видим, что при определении фокусных расстояний расхождение между расчетом и опытом составляет 10—15%. Если учесть, что практически в электронно-оптических системах всегда предусматривается возможность регулировки и настройки системы, то можно признать такое совпадение расчета с опытом удовлетворительным. Необходимо также отметить, что во всех опытах экспериментально определенное фокусное расстояние получилось меньше расчетного. Это позволяет предположить, что при использовании сеток с более мелким шагом будет получено еще лучшее совпадение теории с экспериментом.

Исходя из вышеизложенного, рассмотренный метод расчета, по-видимому, может быть рекомендован для широкого использования при проектировании одиночных линз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронная микроскопия, под ред. акад. А. А. Лебедева, Гос. н.л. техн.-теорет. лит., М., 1954.
2. E. Regenstreif, Annales de Radioelectricite, т. 6, № 23, 1951.
3. E. Regenstreif, Annales de Radioelectricite, т. 6, № 24, 1951.
4. М. В. Кот, Ученые записки Кишневского Гос. Университета, серия Физ. мат., том II, 1954.
5. А. Рустерхольц, Электронная оптика, ИЛ, М., 1952.
6. W. Glaser, Grundlagen der Elektronenoptik, Wien, 1952.

Поступила 11/XI 1956 г.

Канд. техн. наук, доц. Л. А. ДУДНИК

К ВОПРОСУ О ПОГРЕШНОСТЯХ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП

1. Общие замечания о погрешностях измерения параметров электронных ламп

Определение погрешностей при измерении параметров электронных ламп связано с некоторыми особенностями. Особенности эти заключаются в том, что точность измерения параметров находится в сложной зависимости от:

1. Погрешностей метода, применяемого для измерения того или иного параметра или степени точности формулы, применяемой для вычисления измеряемой величины по данным, измеренным на опыте.

2. Погрешностей, возникающих вследствие изменения режима работы испытываемой лампы, происходящих из-за изменения напряжения источников питания лампы, причем изменение напряжения источников питания лампы может происходить:

- а) за счет нестабильности источника питания вследствие колебания напряжения первичной цепи;
- б) вследствие падения напряжения на источнике питания при изменении тока потребляемого лампой.

Особенно велико может быть это изменение, во-первых, при большом внутреннем сопротивлении источника питания и, во-вторых, при испытании ламп с большими анодными токами.

3. Погрешностей измерительных приборов, по которым устанавливается режим работы лампы, кроме погрешности прибора, по которому отсчитывается сама измеряемая величина.

2. Погрешности метода

При измерении статических параметров S , μ и R , применяется довольно большое количество методов. Мы остановимся на

определении погрешностей трех из них: а) метода двух точек; б) метода переменной слагающей анодного тока при отсутствии стабилизации и в) метода переменной слагающей анодного тока с электронным стабилизатором (метод Д. В. Сергеева).

а) Метод двух точек состоит в том, что приращения, необходимые для определения параметров, добавляются к постоянным напряжениям, поданным на электроды лампы, для создания режима питания лампы. Постоянные приращения могут быть поданы и измерены при помощи тех же источников питания и приборов, которые служат для подачи и измерения режима питания. Однако в этом случае нельзя достичь сколько нибудь удовлетворительных результатов по точности измерения. Поэтому на практике приращения подаются и измеряются при помощи дополнительных источников питания и измеряются при помощи чувствительных приборов, как это показано на рис. 1.

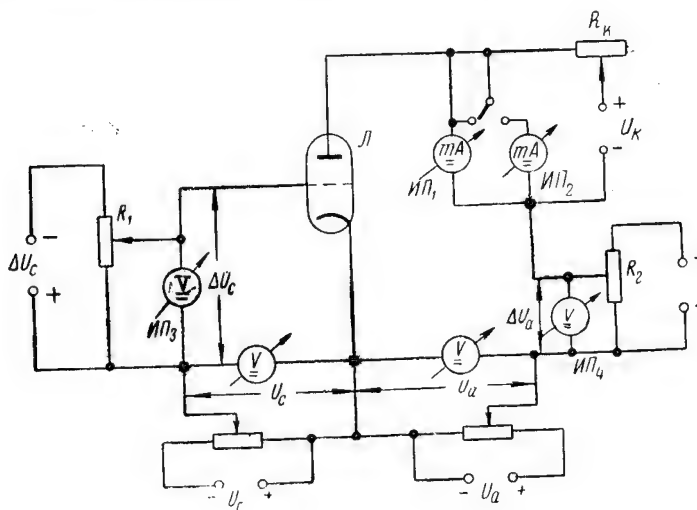


Рис. 1. Схема метода двух точек

Определение параметров S , μ и R_i с помощью приведенной схемы производится по формулам:

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{dI_{a_{\text{н}}}}{dU_{c_{\text{н}}}}; (U_a = \text{const}); \\ R_i &= \frac{dU_{a_{\text{н}}}}{dI_{a_{\text{н}}}}; (U_c = \text{const}); \\ \mu &= \frac{dU_{a_{\text{н}}}}{dU_{c_{\text{н}}}}; (I_a = \text{const}). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Однако, на практике используют приближенные формулы:

$$\left. \begin{aligned} S &= \frac{\Delta I_{a\sim}}{\Delta U_{c\sim}}; (U_a = \text{const}); \\ R_i &= \frac{\Delta U_{a\sim}}{\Delta I_{a\sim}}; (U_c = \text{const}); \\ \mu &= \frac{\Delta U_{a\sim}}{\Delta U_{c\sim}}; (I_a = \text{const}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

и, следовательно, погрешность метода определяется величиной отступлений (2) от (1). Для различных случаев эти отступления будут различны; они зависят от того, какой участок характеристики лампы используется для измерений, и каковы величины ΔI_a и ΔU_c . Нужно отметить, что уменьшение ΔI_a и ΔU_c приведет, с одной стороны, к уменьшению погрешности метода, а с другой стороны, увеличит приборные ошибки.

При разумно выбранных величинах приращений, этой ошибкой на практике можно пренебречь.

б) Метод переменной слагающей анодного тока для измерения крутизны характеристики состоит в том, что сеточное приращение, необходимое для определения крутизны характеристики, подается переменным и измеряется переменная составляющая в анодной цепи лампы

$$S = \frac{\Delta I_{a\sim}}{\Delta U_{c\sim}} \quad \text{при} \quad U_a = \text{const}. \quad (3)$$

Для измерения переменной составляющей в анодной цепи лампы помещается либо измерительный трансформатор, либо омическое сопротивление (рис. 2). Измеряя падение напряжения на нем

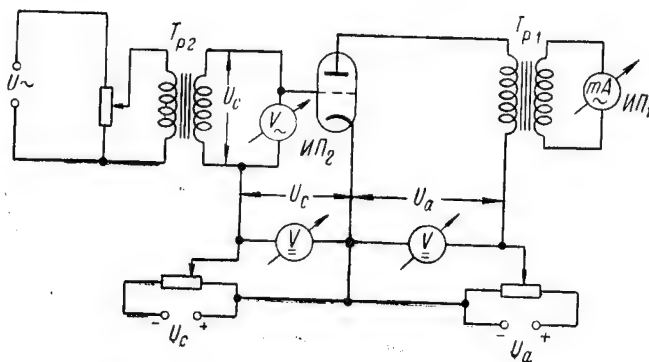


Рис. 2. Схема метода переменной слагающей анодного тока (с измерительным трансформатором)

и, зная сопротивление нагрузки лампы R_a , находим переменную составляющую тока. Величина анодной нагрузки является причиной создания погрешности этого метода. Погрешность эта будет зависеть от величины R_a и внутреннего сопротивления лампы, крутизна характеристики которой измеряется.

Относительная погрешность метода в этом случае будет

$$\frac{\partial S}{S} = \frac{R_a}{R_i + R_a}. \quad (4)$$

Для ламп, имеющих внутреннее сопротивление $R_i = 10^4$ ом (для высокочастотных пентодов и тетродов), погрешность эта будет порядка $\sim 3\%$, при обычно принятом на практике сопротивлении нагрузки $R_a = 300$ ом.

Для ламп, имеющих малое внутреннее сопротивление порядка 300—500 ом (например, триод 6Н5С $R_i = 460$ ом), относительная погрешность при той же анодной нагрузке может достигать до 50%.

в) Д. В. Сергеев [2] предложил для питания анодной (и экранной) цепи лампы источник с электронным стабилизатором. Так как такой источник обладает малым внутренним сопротивлением, то включая анодную нагрузку лампы внутри стабилизатора, соответствующим образом можно значительно уменьшить ее сопротивление.

Принцип измерения крутизны характеристики по методу переменной слагающей анодного тока с электронным стабилизатором заключается в следующем: на сетку испытываемой лампы подается переменная составляющая. Анодная цепь лампы получает питание от электронного стабилизированного выпрямителя, в катодной цепи регулирующей лампы которого включена анодная нагрузка. На этом сопротивлении образуется падение напряжения, пропорциональное величине переменной составляющей анодного тока лампы, которое и измеряется ламповым вольтметром (рис. 3).

Поскольку электронный стабилизатор обладает весьма малым внутренним сопротивлением, анодная нагрузка для лампы практически отсутствует.

Крутизна характеристики по этому методу определяется по формуле [2]

$$S = \frac{U_2}{U_1 R_a} \left[1 + \frac{R_a}{R_i} \right]; \quad (5)$$

на практике применяется приближенная формула

$$S = \frac{U_2}{U_1 R_a}. \quad (6)$$

Ошибка за счет отбрасывания члена $\left[1 - \frac{1 + \frac{R_a}{R_i}}{K} \right]$ при $R_i = R_a$ и при $R_i = 10^4$ ом и $K \gg 100$ будет $\approx 2\%$.

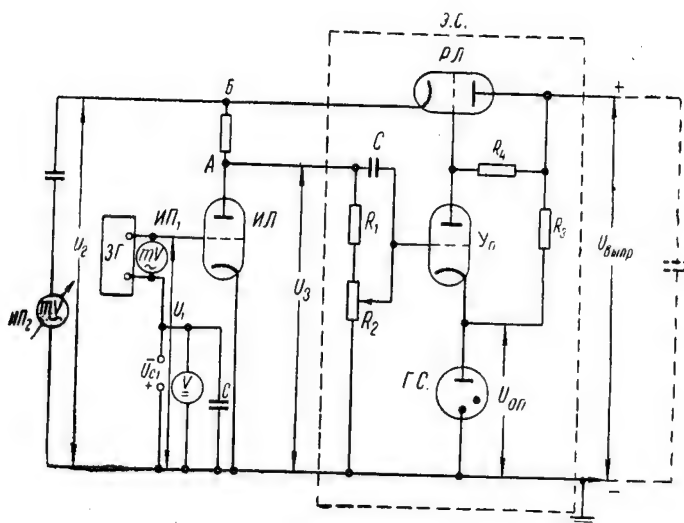


Рис. 3. Схема метода переменной слагающей анодного тока с электронным стабилизатором (метод Д. В. Сергеева)

Сравнивая погрешности двух последних методов, на первый взгляд может показаться, что они одного порядка. Однако метод «в» не содержит погрешностей, связанных с нестабильностью источника питания лампы и, следовательно, используя (6) мы получим более точное значение крутизны (если не учитывать погрешности приборов), тогда как метод «б» менее точен, так как включает погрешности, связанные с нестабильностью источников питания.

3. Погрешности, возникающие за счет изменения режима работы лампы

а. Нестабильность источника питания вследствие колебания напряжения цепи. Положим, что при изменении напряжения анода на величину δU_a происходит изменение анодного тока на величину δI_a . Тогда абсолютная

погрешность, происходящая при таком изменении, определится из соотношения

$$\Delta I_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_a} \Delta U_a. \quad (7)$$

Если изменяется напряжение на первой сетке ΔU_{c1} , то точно также ему будет соответствовать изменение анодного тока и

$$\Delta I_a = \frac{\partial I_a}{\partial U_{c1}} \Delta U_{c1} \quad (8)$$

и так далее. (Можно записать подобные выражения для действия других электродов). Отметим, что величины ΔU_a , ΔU_{c1} и т. д. определяются, как

$$\Delta U_i = U_i \cdot 0,01, \quad (9)$$

где U_i — показание соответствующего прибора 1 класса. Для многоэлектродной лампы эти погрешности будут складываться.

б. Падение напряжения на источнике питания при изменении тока, потребляемого лампой. Погрешности подобного рода возникают в случаях применения схем без стабилизации питания. В таких схемах существенную роль играет внутреннее сопротивление источника питания, а также величина разброса по анодному току лампы. Если сопротивление источника питания $R_{ин}$, то при изменении тока на ΔI_a происходит изменение анодного напряжения на

$$\Delta U_a = \Delta I_a R_{ин}.$$

Если величины $R_{ин}$ и ΔI_a малы, то и погрешность, обусловливаемая колебаниями анодного напряжения, тоже невелика.

Предположим, что сопротивление источника питания $R_{ин} = 500 \text{ ом}$, тогда для лампы типа 6Ж8 у которой $I_a = 3 \pm 1 \text{ ма}$, падение напряжения на источнике питания при колебаниях анодного тока на $\pm 1 \text{ ма}$ составит $0,5 \text{ в}$ и ошибка по отношению к общему напряжению $U_a = 300 \text{ в}$ будет $\Delta U_a = 0,3\%$. Для лампы с большим током анода — 6П3, у которой $I_a = 72 \pm 14 \text{ ма}$, колебания анодного напряжения составят $\Delta U_a \approx 7 \text{ в}$, то есть $\approx 2\%$.

4. Влияние погрешностей измерительных приборов на ошибку в определении параметров электронных ламп

В зависимости от применяемого метода определения параметров S , μ и R_i может быть различной роль погрешностей приборов. Поэтому будут изложены случаи применения следующих методов: а) метода двух точек, б) метода переменной слагающей

анодного тока, при отсутствии электронного стабилизатора напряжения и в) метода переменной слагающей анодного тока с применением электронной стабилизации.

а) Метод двух точек. Для определения статических параметров электронных ламп необходимо произвести непосредственные измерения величин U_a , U_c , I_a их приращения и т. д. и по (2) подсчитать искомые параметры. Из этих формул найдем

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\partial(\Delta I_{a-})}{\Delta I_a} + \frac{\partial(\Delta U_{c-})}{\Delta U_{c-}}; \quad (10)$$

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = \frac{\partial(\Delta U_{a-})}{\Delta U_{a-}} = \frac{\partial(\Delta I_{a-})}{\Delta I_{a-}}; \quad (11)$$

$$\frac{\Delta \mu}{\mu} = \frac{\partial(\Delta U_{a-})}{\Delta U_{a-}} + \frac{\partial(\Delta U_{c-})}{\Delta U_{c-}}. \quad (12)$$

Для примера определим крутизну характеристики лампы 6ПЗ. По ГОСТ 1879 выбираем класс точности прибора 1,0. На схеме с компенсацией анодного тока для измерения приращений напряжений и токов могут применяться приборы, отличные от приборов, измеряющих параметры режима. Поэтому выбираем для измерения приращения анодного тока миллиамперметр со шкалой на 15 ма, тогда абсолютная погрешность по прибору будет $\partial(\Delta I_a) = 0,15$ ма.

Для измерения приращения сеточного смещения берем шкалу прибора 1,0 в, тогда абсолютная погрешность прибора будет $\partial(\Delta U_c) = 0,01$ в.

Относительная погрешность при измерении крутизны характеристики, принимая во внимание, что отсчет по шкале будет браться с учетом коэффициента вероятности 0,7, будет

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\partial(\Delta I_a)}{\Delta I_a} + \frac{\partial(\Delta U_c)}{\Delta U_c} = \frac{0,15}{3} + \frac{0,01}{0,5} = 7\%;$$

$$0,7 \frac{\Delta S}{S} = 5\%.$$

б) Метод переменных слагающих анодного тока при отсутствии электронного стабилизатора напряжения. Используя этот метод, можно определить крутизну характеристики и внутреннее сопротивление лампы. Рассмотрим в качестве примера определение погрешности крутизны

¹ В формулах (10—12) $\partial(\Delta I_{a-})$ и т. д. есть погрешность измерения приращения соответствующих токов и напряжений.

характеристики. Относительная погрешность определения крутизны характеристики по формуле, сходной с предыдущей, будет

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\delta(\Delta I_a)_{\sim}}{\Delta I_a_{\sim}} + \frac{\delta(\Delta U_c)_{\sim}}{\Delta U_c_{\sim}}. \quad (13)$$

Однако, величины ΔI_a_{\sim} и ΔU_c_{\sim} измеряются с помощью приборов переменного тока. Класс точности приборов переменного тока при измерении малых напряжений на сетке (ниже 5 в) по ГОСТ допускается 2,5. При измерении анодного тока приемноусилительных ламп класс точности приборов допускается 1,5.

Подсчитаем погрешность по приборам при измерении крутизны характеристики для лампы 6ПЗ. Возьмем для измерения анодного тока прибор со шкалой 5 ма и для измерения сеточного напряжения ламповый вольтметр со шкалой 1,0 в; относительная погрешность при измерении крутизны характеристики

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{0,075}{1,2} + \frac{0,015}{0,2} = 14\%.$$

в) Метод переменных приращений с применением электронного стабилизатора напряжения. Используя этот метод, можно определить все три параметра лампы S , μ и R_a . Так же как и ранее, определим относительную погрешность измерения крутизны характеристики. Используя (6), получим относительную погрешность

$$\frac{\delta S}{S} = \frac{\delta(\Delta U_1)}{\Delta U_1} + \frac{\delta(\Delta U_2)}{\Delta U_2} + \frac{\delta(\Delta R_a)}{\Delta R_a}. \quad (14)$$

Вычисляем величину этой погрешности для той же лампы (6ПЗ), учитывая, что величина $\frac{\delta(\Delta R_a)}{\Delta R_a}$ есть относительная погрешность калибровки сопротивления R_a и по порядку величин составляет 0,5%. Для измерения напряжения ΔU_1 и ΔU_2 выбираем ламповые вольтметры со шкалой 1,0 в класса 1,5, тогда $\delta(\Delta U_1) = 0,015$ в и относительная погрешность $\frac{\Delta S}{S} \cong 15\%$, а с учетом коэффициента вероятности $\sim 10\%$.

5. Определение погрешностей при измерении параметров режима работы лампы

а) Погрешности при измерении тока накала. Вследствие того, что измерение тока накала производится при отсутствии напряжения на всех электродах лампы, за исключе-

нием катода, ток накала есть функция только напряжения накала

$$I_n = f(U_n). \quad (15)$$

Величина абсолютной погрешности определится из соотношения

$$\Delta I_n = \frac{\partial I_n}{\partial U_n} \Delta U_n. \quad (16)$$

Здесь ΔU_n — приведенная относительная погрешность прибора (приведенной относительной погрешностью измерительного прибора ΔU называется погрешность, выраженная в процентах от верхнего предела измерений прибора). Так как нами взяты приборы класса 1,0, то относительная приведенная погрешность будет равняться верхнему пределу шкалы, умноженному на один процент от полной шкалы. Используя (16), найдем величину абсолютной и относительной погрешностей для мощного усилительного триода ГМ-1А с катодом прямого накала [4]. Ток накала этой лампы $I_n = 190$ а, напряжение накала $U_n = 12,5$ в.

В соответствии с проектом ГОСТа для мощных усилительных ламп приборы переменного тока должны иметь класс точности не ниже 2,5. Пусть напряжение накала измерено прибором класса точности 1,0 и ток — прибором класса точности 2,5. По характеристике лампы величина $\frac{\partial I_n}{\partial U_n} = 10,5 \frac{a}{v}$. Если шкала вольтметра рассчитана на 15 в, то величина $\Delta U_n = 15 \cdot 0,01 = 0,15$ в. Тогда, абсолютная погрешность измерения тока накала

$$\Delta I_n = 10,5 \cdot 0,15 = 1,6 \text{ а.}$$

При измерении U_n приборами класса точности 2,5 получим для $\Delta U_n = 15 \cdot 0,025 = 0,375$ в и соответственно

$$\Delta I_n = 10,5 \cdot 0,375 = 4 \text{ а.}$$

Относительная погрешность при измерении тока накала

$$\frac{\Delta I_n}{I_n} = \frac{4}{190} \cong 2\%.$$

б) Погрешности при измерении тока эмиссии катода. Величина тока эмиссии зависит от температуры катода. В связи с тем, что измерение температуры катода электронной лампы является весьма затруднительным, то на практике обычно используют зависимость тока эмиссии от напряжения накала или тока накала. Большая точность измерения напряжения определяет преимущественное измерение эмиссии катода по напряжению накала. Рассмотрим сначала простой случай, когда на-

пряжение накала стабилизировано и погрешность измерения тока эмиссии зависит от погрешности вольтметра, включенного в цепь накала, и погрешности прибора, по которому измеряется эмиссия. Тогда

$$\Delta I_e = \Delta I_e' + \frac{\partial I_e}{\partial U_n} \Delta U_n, \quad (17)$$

где $\Delta I_e'$ и ΔU_n — инструментальные погрешности;

$\frac{\partial I_e}{\partial U_n}$ — легко определяется по соответствующей характеристике лампы.

Более сложным будет случай, когда цепь накала питается нестабилизированным напряжением и расчет погрешности должен быть произведен аналогично указанному в разделе 3.

Определение погрешностей описанного способа справедливо для чисто металлических катодов, имеющих область насыщения на вольтамперной характеристике анодного тока.

При определении эмиссии сложных катодов возникает дополнительная ошибка, связанная с экстраполяцией значения электронного тока до насыщения.

в) Вычисление погрешностей при измерении тока анода лампы. Погрешность при измерении тока анода будет зависеть от стабильности источника питания, погрешностей приборов, устанавливающих рабочий режим лампы и погрешности прибора, измеряющего ток анода. На определении погрешностей за счет нестабильности источника питания мы здесь не будем останавливаться, так как этот вопрос разобран в пп. За и б.

Анодный ток многоэлектродной лампы (тетрода) будет являться сложной функцией вида

$$I_a = f(U_n; U_a; U_c; U_{c2});$$

полная абсолютная погрешность такой функции

$$\Delta I = \frac{\partial I_a}{\partial U_n} \Delta U_n + \frac{\partial I_a}{\partial U_a} \Delta U_a + \frac{\partial I_a}{\partial U_{c1}} \Delta U_{c1} + \frac{\partial I_a}{\partial U_{c2}} \Delta U_{c2}, \quad (18)$$

где ΔU_n , ΔU_a , ΔU_{c1} и т. д. являются приведенными относительными погрешностями прибора.

Частные производные этой функции легко находятся из характеристик электронных ламп.

Выводы

1. Рассмотрены погрешности, происходящие при измерении параметров электронных ламп тремя методами, а также погрешности при измерении параметров режима работы электронных ламп.

2. Произведена приблизительная оценка погрешностей при измерении параметров промышленных ламп типа 6ПЗ, 6Ж8 и ГМ-1А.

В заключение выражаю благодарность заслуженному деятелю науки проф. Б. А. Козыреву за интерес к работе и ряд ценных указаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Ф. М а л и к о в, Введение в технику измерений, Гос. научно-техническое издательство машиностроительной литературы, М., 1952.

2. Д. В. Сергеев, Основные погрешности при измерении параметров прямо-усилительных ламп на установке ИПУ-1, Доклад на секции НТС МЭСЭП СССР, 1953.

3. Р. С. Медведев, «Измерительная техника» № 2, 1955.

4. Электровакuumные приборы, Справочник, т. I, МРТП, 1952.

Поступила 27/III 1957 г.

Канд. физ.-мат. наук И. И. ПОСТОЕВА

О ПРИБЛИЖЕНИИ ФУНКЦИЙ В СВЕТЕ НОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Все возрастающее использование высокоскоростных вычислительных машин оживило интерес к вопросам приближения функций вещественной переменной, особенно, полиномами.

За последние годы в литературе появились работы, посвященные этим вопросам в связи с требованиями работы на электронных машинах. Настоящая работа представляет обзор статей [1, 2, 3, 4] с соответствующими исправлениями и уточнениями, которые потребовалось внести в части, касающейся вопросов теории аппроксимирования функций.

При работе с высокоскоростными вычислительными машинами естественно возникает вопрос о предпочтительности выбора того или иного способа приближения функции, диктуемого самим устройством электронной машины. Так, решение задачи при помощи интерполирования предполагает хранение в машине таблиц значений функции, например, для равноотстоящих значений аргумента, что при условии достаточно высокой степени точности трудно выполнимо, так как может потребовать слишком большого «объема памяти» в электронной машине.

В противоположность этому, хранение коэффициентов полинома, который представляет функцию с желаемой степенью точности в определенной области, мало загружает запоминающее устройство машины.

В качестве приближающего полинома всегда возможно взять конечный отрезок ряда Тейлора. Однако, в большинстве случаев, выгоднее брать конечный отрезок разложения в ряд функции по полиномам Чебышева, которые, если функция $f(x)$ рассматривается в промежутке $(-1, +1)$, имеют вид

$$T_n(x) = \cos n \arccos x.$$

Разложение функции по этим полиномам дается формулой

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k T_k(x),$$

где коэффициенты разложения определяются следующим образом:

$$A_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^{+1} \frac{f(x) dx}{\sqrt{1-x^2}}$$

и

$$A_k = \frac{2}{\pi} \int_{-1}^{+1} f(x) T_k(x) \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}},$$

при $k \geq 1$.

Можно показать [5], что частная сумма

$$\sum_{k=0}^{k=n} A_k T_k(x) \quad (1)$$

дает приближение к разлагаемой функции, которое лишь на множитель $(3 + \ln n)$ отличается от наилучшего приближения E_n этой функции полиномами порядка n .

Для «хороших» функций наилучшее приближение быстро убывает с возрастанием n , так что уже для небольших n величина E_n оказывается весьма малой и так как при небольших n множитель $(3 + \ln n)$ также невелик, то и погрешность приближения, даваемого суммой (1), оказывается малой.

Авторы цитируемых статей указывают, что многие свойства полиномов Чебышева и способы, при помощи которых могут быть получены бесконечные разложения функций в ряды по этим полиномам, рассматриваются в предисловии к таблицам [4]; согласно обозначениям автора этих таблиц полином Чебышева для отрезка $0 \leq x \leq 1$ имеет вид

$$T_n^*(x) = \cos n \theta;$$

$$\cos \theta = 2x - 1.$$

В приложении I даны таблицы, которые облегчают вычисление полиномиальных приближений для некоторых элементарных функций. Коэффициенты в разложениях по полиномам Чебышева, действительным в указанных пределах, даются с девятью десятичными знаками. Также, приводятся формулы для самих полиномов Чебышева.

Приближающий полином строится следующим образом: удерживается несколько членов бесконечного ряда; округляются коэффициенты; получающийся полином располагается по степеням независимой переменной.

В качестве примера рассмотрим приближение к $\sin \frac{1}{2} \pi x$ в интервале $-1 \leq x \leq +1$ многочленом

$$x \sum_{n=0}^5 A_n T_n^*(x^2),$$

а именно:

$$\begin{aligned} \sin \frac{1}{2} \pi x = & x[1,276278962 - 0,285261569(2x^2-1) + \\ & + 0,009118016(8x^4-8x^2+1) - 0,000136587(32x^6-48x^4+ \\ & + 18x^2-1) + 0,000001185(128x^8-256x^6+160x^4-32x^2+1) - \\ & - 0,000000007(512x^{10}-1280x^8+1120x^6-400x^4+50x^2-1)]. \quad (2) \end{aligned}$$

В этом случае ряд быстро сходится, остаточный член будет мал и главная ошибка в приближении будет возникать за счет округления коэффициентов A_n .

Если, например, требуемая точность приближения 10^{-k} , где $k < 9$, то, при выполнении промежуточных вычислений, выгодно брать не k , а $k+1$, или $k+2$ знаков после запятой для того, чтобы уменьшить ошибку округления. Предположим, что аппроксимация к $\ln(1+x)$ в промежутке $0 \leq x \leq 1$ достаточна с точностью трех десятичных знаков. Рассмотрение коэффициентов ряда

$$\ln(1+x) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n T_n^*(x),$$

приведенных в приложении I, показывает, что $A_n < 0,0005$, когда $n \geq 3$ и что

$$\sum_{n=4}^{\infty} |A_n| = 0,000503 \dots$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \ln(1+x) = & 0,37645 + 0,34315(2x-1) - 0,02944(8x^2-8x+1) + \\ & + 0,00337(32x^3-48x^2+18x-1) - 0,00049 + 0,98248x - \\ & - 0,39728x^2 + 0,10784x^3, \end{aligned}$$

с максимумом ошибки не превосходящим 0,00053.

В статье [3] автор показывает как можно вычислить отрезок ряда по полиномам Чебышева, даже не прибегая к таблицам самих полиномов. Если отрезок ряда имеет вид

$$f(x) = A_0 + A_1 T_1^*(x) + A_2 T_2^*(x) + \dots + A_n T_n^*(x), \quad (3)$$

где, как и выше

$$T_n^*(x) = \cos n \Theta;$$

$$\cos \Theta = 2x - 1; 0 \leq x \leq 1,$$

то для вычисления $f(x)$ по заданному значению x строится последовательность B_N, B_{N-1}, \dots, B_0 , такая, что

$$B_{N+2} = B_{N+1} = 0$$

и

$$B_n - (4x-2)B_{n+1} + B_{n+2} = A_n, \quad (4)$$

$$n = N, N-1, \dots, 1, 0.$$

Тогда

$$f(x) = B_0 - (2x-1)B_1. \quad (5)$$

Этот результат может быть проверен при помощи известного рекуррентного соотношения

$$T_n^*(x) - (4x-2)T_{n+1}^*(x) + T_{n+2}^*(x) = 0.$$

Подробное исследование вопроса о точности вычисления $f(x)$ показывает, что хотя ошибка в B_n может быть велика, если N велико, ошибка в $f(x)$ незначительна.

Интересно отметить, что подобная схема вычисления отрезка ряда годится и для других рядов по функциям, удовлетворяющим линейным рекуррентным соотношениям, например, для рядов Неймана по Бесселевым функциям.

Пусть

$$f(x) = a_0 p_0(x) + a_1 p_1(x) + \dots + a_n p_n(x),$$

где

$$p_{n+1}(x) + \alpha_n p_n(x) + \beta_n p_{n-1}(x) = 0 \quad (6)$$

и где α_n, β_n могут зависеть как от x , так и от n . Образует последовательность

$$b_N, b_{N-1}, \dots, b_0,$$

где

$$b_{N+1} = b_{N+2} = 0$$

и

$$b_n + \alpha_n b_{n+1} + \beta_{n+1} b_{n+2} = a_n,$$

$$n = N, N-1, \dots, 0.$$

Применяя рекуррентное соотношение (6), получим

$$f(x) = b_0 p_0(x) + b_1 [p_1(x) + \alpha_0 p_0(x)].$$

В статье [2], посвященной приближению тригонометрических функций, рассматриваются, кроме разложений по полиномам Чебышева, также разложения по полиномам Лежандра, которые дают минимум интеграла квадрата разности между функцией и аппроксимирующим полиномом в промежутке $(-1, +1)$.

Требуемые разложения [6]

$$\sin\left(\frac{\pi x}{2}\right) = 2 \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m I_{2m+1}\left(\frac{\pi}{2}\right) T_{2m+1}(x);$$

$$\cos\left(\frac{\pi x}{2}\right) = I_0\left(\frac{\pi}{2}\right) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m I_{2m}\left(\frac{\pi}{2}\right) T_{2m}(x).$$

Полиномы Лежандра определяются известными формулами [7]:

$$P_0(x) = 1; \quad P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n (x^2 - 1)^n}{dx^n}$$

и

$$\sin\left(\frac{\pi x}{2}\right) = 3 I_{3/2}\left(\frac{\pi}{2}\right) P_1(x) - 7 I_{5/2}\left(\frac{\pi}{2}\right) P_3(x) +$$

$$+ 11 I_{7/2}\left(\frac{\pi}{2}\right) P_5(x) - \dots;$$

$$\cos\left(\frac{\pi x}{2}\right) = 1 \cdot I_{1/2}\left(\frac{\pi}{2}\right) P_0(x) - 5 I_{3/2}\left(\frac{\pi}{2}\right) P_2(x) +$$

$$+ 9 I_{5/2}\left(\frac{\pi}{2}\right) P_4(x) - \dots$$

Оба типа разложений находят применение в программировании для высокоскоростных вычислительных машин и, например, часто используются в работах лаборатории Лондонского Университета. Так как численные коэффициенты рядов трудно найти в литературе и так как они представляют интерес и для других работников в этой области, они приведены в приложении II.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Коэффициенты Чебышева

$$\sin \frac{1}{2} \pi x$$

n	A_n
0	1,276278962
1	-0,285261569
2	0,009118016
3	-0,000136587
4	0,000001185
5	-0,000000007

$$\sin \frac{1}{2} \pi x = x \sum_{n=0}^{\infty} A_n T_n^*(x^2),$$

$$-1 \leq x \leq 1.$$

$$\operatorname{arctg} x$$

n	A_n
0	0,881373587
1	-0,105892925
2	0,011135843
3	-0,001381195
4	0,000185743
5	-0,000026215
6	0,000003821
7	-0,000000570
8	0,000000086
9	-0,000000013
10	0,000000002

$$\operatorname{arctg} x = x \sum_{n=0}^{\infty} A_n T_n^*(x^2),$$

$$-1 \leq x \leq 1.$$

Для $x > 1$ использовать

$$\operatorname{arctg} x = \frac{1}{2} \pi - \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{x} \right).$$

$$\cos \frac{1}{2} \pi x$$

n	A_n
0	0,472001216
1	-0,499403258
2	0,027992080
3	-0,000596695
4	0,000006704
5	-0,000000047

$$\cos \frac{1}{2} \pi x = \sum_{n=0}^{\infty} A_n T_n^*(x^2),$$

$$-1 \leq x \leq 1$$

$$\operatorname{arc} \sin x, \quad \operatorname{arc} \cos x$$

n	A_n
0	1,051231959
1	0,054946487
2	0,004080631
3	0,000407890
4	0,000046985
5	0,000005881
6	0,000000777
7	0,000000107
8	0,000000015
9	0,000000002
10	—

$$\operatorname{arc} \sin x = x \sum_{n=0}^{\infty} A_n T_n^*(2x^2),$$

$$-\frac{1}{2} \sqrt{2} \leq x \leq \frac{1}{2} \sqrt{2}$$

$$\operatorname{arc} \cos x = \frac{1}{2} \pi - x \sum_{n=0}^{\infty} A_n T_n^*(2x^2),$$

$$0 \leq x \leq \frac{1}{2} \sqrt{2}.$$

Для $\frac{1}{2} \sqrt{2} \leq x \leq 1$ использовать

$$\operatorname{arc} \sin x = \operatorname{arc} \cos(1-x^2)^{1/2}$$

$$\operatorname{arc} \cos x = \operatorname{arc} \sin(1-x^2)^{1/2}$$

$$\frac{e^x}{A_n}$$

n	A_n
0	1,753387654
1	0,850391654
2	0,105208694
3	0,008722105
4	0,000543437
5	0,000027115
6	0,000001128
7	0,000000040
8	0,000000001

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} A_n T_n^*(x),$$

$$0 \leq x \leq 1.$$

$$\frac{\ln(1+x)}{A_n}$$

n	A_n
0	0,376452813
1	0,343145750
2	-0,029437252
3	0,003367089
4	-0,000433276
5	0,000059471
6	-0,000008503
7	0,000001250
8	-0,000000188
9	0,000000029
10	-0,000000004
11	0,000000001

$$\ln(1+x) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n T_n^*(x),$$

$$0 \leq x \leq 1.$$

$$\frac{I_0(x)}{A_n}$$

n	A_n
0	0,031540613
1	-0,214616183
2	0,004336620
3	-0,266203654

$$\frac{e^{-x}}{A_n}$$

n	A_n
0	0,645035270
1	-0,312841606
2	0,038704116
3	-0,003208683
4	0,000199919
5	-0,000009975
6	0,000000415
7	-0,000000015

$$e^{-x} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n T_n^*(x),$$

$$0 \leq x \leq 1.$$

$$\frac{\Gamma(1+x)}{A_n}$$

n	A_n
0	0,941785598
1	0,004415381
2	0,056850437
3	-0,004219835
4	0,001326808
5	-0,000189303
6	0,000036069
7	-0,000006057
8	0,000001056
9	-0,000000181
10	0,000000031
11	-0,000000005
12	0,000000001

$$\Gamma(1+x) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n T_n^*(x),$$

$$0 \leq x \leq 1.$$

$$\frac{I_1(x)}{A_n}$$

n	A_n
0	0,0694243523
1	-0,1155779057
2	0,1216794099
3	-0,1148840465

4 0,306125520
5 -0,136388770
6 0,034347540
7 -0,005698082
8 0,000677504
9 -0,000060947
10 0,000004309
11 -0,000000246
12 0,000000012

4 0,0577905331
5 -0,0169238801
6 0,0032350252
7 -0,0004370609
8 0,0000440991
9 -0,0000034583
10 0,0000002172
11 -0,0000000112
12 0,0000000005

$$I_0(x) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n T_n^* \left(\frac{x^2}{100} \right),$$

$-10 < x < 10.$

$$I_1(x) = x \sum_{n=0}^{\infty} A_n T_n^* \left(\frac{x^2}{100} \right)$$

$-10 < x < 10.$

$T_n^*(x)$

- n
- 0 1.
- 1 $2x-1.$
- 2 $8x^2-8x+1.$
- 3 $32x^3-48x^2+18x-1.$
- 4 $128x^4-256x^3+160x^2-32x+1.$
- 5 $512x^5-1280x^4+1120x^3+400x^2+50x-1.$
- 6 $2048x^6-6144x^5+6912x^4-3584x^3+840x^2+72x+1.$
- 7 $8192x^7-28672x^6+39424x^5-26880x^4+9408x^3-1568x^2+98x-1.$
- 8 $32768x^8-131072x^7+212992x^6-180224x^5+84480x^4-21504x^3+2688x^2-128x+1.$
- 9 $131072x^9-589824x^8+1105920x^7-1118208x^6+658944x^5-228096x^4+44352x^3-4320x^2+162x-1.$
- 10 $524288x^{10}-2621440x^9+5570560x^8+6553600x^7+4659200x^6-2050048x^5+549120x^4-84480x^3+6600x^2-200x+1.$
- 11 $2097152x^{11}-11534336x^{10}+27394048x^9-36765696x^8+30638080x^7-16400384x^6+5637632x^5-1208064x^4+151008x^3-9680x^2+242x-1.$
- 12 $8388608x^{12}-50331648x^{11}+132120576x^{10}-199229440x^9+190513152x^8-120324096x^7+5692096x^6-14057472x^5+2471040x^4-256256x^3+13728x^2-288x+1.$

ПРИЛОЖЕНИЕ II

n	$I_n\left(\frac{\pi}{2}\right)$	n	$I_n\left(\frac{\pi}{2}\right)$
0	0,47200121577	0,5	0,63661977237
1	0,56682408891	1,5	0,40528473457
2	0,24970162914	2,5	0,13741705403
3	0,06903588829	3,5	0,03212733371
4	0,01399603981	4,5	0,00575321708
5	0,00224535712	5,5	0,00083617200
6	0,00029834760	6,5	0,00010234280
7	0,00003385064	7,5	0,00001082285
8	0,00000335220	8,5	0,00000100778
9	0,00000029457	9,5	0,00000008384
10	0,00000002327	10,5	0,00000000630
11	0,00000000167	11,5	0,00000000043
12	0,00000000011	12,5	0,00000000003

ЛИТЕРАТУРА

1. C. W. Clenshaw, Polinomial Approximations to Elementary Functions, Mathematical Tables and other Aids to Computation (MTAC), v. 8, № 47, 1954.
2. A. D. Booth, A note on Approximating Polynomials for Trigonometric Functions, MTAC, v. 9, № 49, 1955.
3. C. W. Clenshaw, A note on the Summation on Chebyshev series, MTAC, v. 9, № 51, 1955.
4. C. Lanczos, Tables of the Chebyshev Polynomials, NBS Applied Math. Series, 9, 1952.
5. И. П. Натансон, Конструктивная теория функций, Госиздтехтеоретлит, М.-Л., 1949.
6. Г. Н. Ватсон, Теория Бесселевых функций, ИЛ, 1949.
7. J. Baer, Crelle's Journal, v. 1.VI, 1859.

Поступила 24/X 1954 г.

Канд. физ.-мат. наук А. Е. ГЕЛЬМАН

**О ПЕРИОДИЧЕСКИХ, КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ
И ОГРАНИЧЕННЫХ РЕШЕНИЯХ ОДНОГО КЛАССА
ЛИНЕЙНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ**

Введение

В прикладных задачах часто встает вопрос о нахождении квазипериодического (или периодического) решения линейного неоднородного уравнения¹, коэффициенты и правая часть которого суть функции квазипериодические (или периодические). При этом бывает необходимо не только доказать существование такого решения, но также дать формулы, позволяющие найти решение с наперед заданной точностью.

Ниже будет рассмотрена и решена эта задача для дифференциального уравнения вида

$$\ddot{y} + f_1(t)\dot{y} + f_2(t)y = f_3(t), \quad (1)$$

где $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ — ограниченные (в частности квазипериодические или периодические) функции.

Задача решается применением метода малого параметра; при этом не только указываются соотношения между параметрами уравнения (1), определяющие область сходимости полученного ряда, но также даются оценки остаточного члена этого ряда (в двух видах). Этот результат дает возможность получать приближенные формулы для решения (1) с какой угодно наперед заданной точностью.

¹ Подобного рода уравнения возникают, например, в теории гироскопов и других, связанных с нею, областях.

Получение подобного рода приближенных формул, куда явно входят различные параметры уравнения (1), особо важно в тех случаях, когда нужно выбрать тот или иной параметр так, чтобы решение обладало некоторыми определенными свойствами.

1. Некоторые леммы

Лемма 1. Пусть функция $\psi(t)$ задана на промежутке $(-\infty, +\infty)$, ограничена на нем

$$|\psi(t)| \leq \bar{\psi} \quad (-\infty < t < +\infty)$$

и интегрируема в любом конечном промежутке. Тогда, если

$$\varphi(t) = e^{At} \int_t^{\infty} \psi(t) e^{-At} dt,$$

где $A > 0$, то

$$|\varphi(t)| \leq \frac{\bar{\psi}}{A};$$

если при этом $\psi(t)$ периодическая, квазипериодическая или почти периодическая функция, то $\varphi(t)$ принадлежит (соответственно) к тому же классу функций.

Аналогично, если

$$\varphi(t) = e^{-At} \int_{-\infty}^t \psi(t) e^{At} dt,$$

где $A > 0$, то

$$|\varphi(t)| \leq \frac{\bar{\psi}}{A}.$$

Доказательство. Имеет место очевидное неравенство

$$|\varphi(t)| \leq e^{At} \int_t^{\infty} |\psi(t)| e^{-At} dt \leq \bar{\psi} e^{At} \int_t^{\infty} e^{-At} dt = \frac{\bar{\psi}}{A}.$$

Докажем теперь, что из периодичности $\psi(t)$ следует периодичность $\varphi(t)$ и что при этом период $\varphi(t)$ совпадает с периодом $\psi(t)$. Пусть ω период $\psi(t)$, т. е.

$$\psi(t + \omega) = \psi(t).$$

Тогда

$$\begin{aligned}\varphi(t+\omega) - \varphi(t) &= e^{A(t+\omega)} \int_{t+\omega}^{\infty} \psi(x) e^{-Ax} dx - e^{At} \int_t^{\infty} \psi(x) e^{-Ax} dx = \\ &= e^{At} \int_t^{\infty} [\psi(x+\omega) - \psi(x)] e^{-Ax} dx = 0,\end{aligned}$$

откуда следует, что $\varphi(t)$ — периодическая функция с периодом ω .

Если $\psi(t)$ функция почти периодическая или, в частности, квазипериодическая, то факт почти или квазипериодичности функции $\varphi(t)$ следует из определения функций этого класса, как равномерно сходящейся последовательности тригонометрических полиномов.

Действительно, легко видеть, во-первых, что, если функция $\psi(t)$ тригонометрический полином, то и соответствующая ей функция $\varphi(t)$ также тригонометрический полином и, во-вторых, что, если дана равномерно сходящаяся последовательность функций $\{\psi_k(t)\}$, то последовательность соответствующих им функций $\{\varphi_k(t)\}$ также будет сходиться равномерно.

Л е м м а 2. Пусть дано уравнение

$$y'' + Ay' + By = \psi(t), \quad (2)$$

где A и B постоянные числа, а функция $\psi(t)$ удовлетворяет условиям леммы 1.

Пусть k_1 и k_2 корни характеристического уравнения

$$k^2 + Ak + B = 0,$$

пусть

$$\alpha_1 = R(k_1) \neq 0, \quad \alpha_2 = R(k_2) \neq 0$$

и

$$d = |k_2 - k_1| = |\sqrt{A^2 - 4B}| \neq 0.$$

Тогда, если $|\psi(t)| < \bar{\psi}$, то существует частное решение уравнения (2) Y такое, что

$$\begin{aligned}|Y| &\leq \frac{\frac{1}{|\alpha_1|} + \frac{1}{|\alpha_2|}}{d} \bar{\psi}, \\ |Y'| &\leq \frac{\left| \frac{k_1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{k_2}{\alpha_2} \right|}{d} \bar{\psi}.\end{aligned}$$

Если, при этом, функция $\psi(t)$ является почти периодической, или, в частности квази или просто периодической функцией, то и Y принадлежит тому же классу функций (соответственно).

Доказательство. Решая (2) методом вариации произвольных постоянных Лагранжа, убеждаемся в существовании частного решения вида

$$Y = \frac{1}{k_2 - k_1} \left[e^{k_1 t} \int \psi(x) e^{-k_1 x} dx + e^{k_2 t} \int \psi(x) e^{-k_2 x} dx \right], \quad (3)$$

где пределы интегрирования расставлены в зависимости от знаков α_1 и α_2 , как в условии леммы 1¹.

Используя лемму 1, получим требуемую оценку для Y .

Дифференцируя Y в (3), получим

$$Y' = \frac{1}{k_2 - k_1} \left[k_1 e^{k_1 t} \int \psi(x) e^{-k_1 x} dx + k_2 e^{k_2 t} \int \psi(x) e^{-k_2 x} dx \right].$$

Откуда, опять употребляя лемму 1, получим оценку для Y' .

Факт принадлежности Y к классам функций, указанных в утверждении леммы 2, также очевидно следует из леммы 1.

Л е м м а 3. Пусть дано уравнение

$$y'' + [A + \lambda \varphi_1(t)]y' + [B + \lambda \varphi_2(t)]y = f(t) \quad (4)$$

и пусть

$$y = y_0 + \lambda y_1 + \lambda^2 y_2 + \dots \quad (5)$$

— формальное разложение какого-либо его решения в ряд по степеням λ .

Тогда для членов последовательности функций $\{y_k\}$ выполнено соотношение

$$\left. \begin{aligned} y''_n + Ay'_n + By_n &= -\varphi_1(t)y'_{n-1} - \varphi_2(t)y_{n-1}; \\ y''_0 + Ay'_0 + By_0 &= f(t). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

¹ Т. е., если $\alpha_1 > 0$, пределы соответствующего интеграла расставлены так:

$$\int_t^\infty \psi(x) e^{-k_1 x} dx;$$

если $\alpha_1 < 0$, то соответствующий интеграл имеет вид

$$\int_{-\infty}^t \psi(x) e^{-k_1 x} dx.$$

Доказательство. Подставляя разложение y в ряд по степеням λ в (4) и выполняя формально алгебраические операции, убеждаемся в справедливости леммы 3.

Лемма 4. Пусть $f(t)$ в (4) удовлетворяет условиям леммы 1 и все y_n из (5) последовательно найдены, как ограниченные на $(-\infty, +\infty)$ решения этих уравнений, так что (5) представляет собой формальное разложение в ряд по степеням параметра λ ограниченного на $(-\infty, +\infty)$ решения уравнения (4).

Пусть при этом введены обозначения:

$$\sup |y''_n + Ay'_n + By_n| = r_n; \quad \bar{\varphi}_1 = \sup |\varphi_1|; \quad \bar{\varphi}_2 = \sup |\varphi_2|.$$

Тогда имеет место неравенство

$$r_n \leq k r_{n-1},$$

где

$$k = \frac{1}{d} \left[\bar{\varphi}_1 \left(\left| \frac{k_1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{k_2}{\alpha_2} \right| \right) + \bar{\varphi}_2 \left(\left| \frac{1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{1}{\alpha_2} \right| \right) \right].$$

Доказательство. Из леммы 2 следует

$$|y_{n-1}| \leq \frac{\frac{1}{|\alpha_1|} + \frac{1}{|\alpha_2|}}{d} r_{n-1}$$

и

$$|y'_{n-1}| \leq \frac{\left| \frac{k_1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{k_2}{\alpha_2} \right|}{d} r_{n-1}.$$

Из (6) предыдущей леммы имеем тогда при $n > 1$

$$r_n = \sup |y''_n + Ay'_n + By_n| = \sup |-\varphi_1 y'_{n-1} - \varphi_2 y_{n-1}| \leq r_{n-1} \frac{1}{d} \left[\bar{\varphi}_1 \left(\left| \frac{k_1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{k_2}{\alpha_2} \right| \right) + \bar{\varphi}_2 \left(\left| \frac{1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{1}{\alpha_2} \right| \right) \right] = k r_{n-1}.$$

2. Основная теорема и некоторые замечания

Теорема. Пусть дано уравнение

$$y'' + [A + \varphi_1(t)]y' + [B + \varphi_2(t)]y = f(t), \quad (7)$$

где $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $f(t)$ — ограниченные на всей вещественной оси функции, и квадратное уравнение

$$k^2 + Ak + B = 0$$

не имеет чисто мнимых, а также кратных корней.

Пусть выполнено неравенство

$$k = \frac{1}{d} \left[\bar{\varphi}_1 \left(\left| \frac{k_1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{k_2}{\alpha_2} \right| \right) + \bar{\varphi}_2 \left(\left| \frac{1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{1}{\alpha_2} \right| \right) \right] < 1$$

(обозначения прежние).

Тогда существует ограниченное на всей вещественной оси решение уравнения (7), представимое в виде равномерно сходящегося на $(-\infty, +\infty)$ ряда функций

$$y = y_0 + y_1 + y_2 + \dots,$$

причем y_k суть ограниченные на $(-\infty, +\infty)$ решения уравнений (6) (лемма 3).

Если при этом функции $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$ и $f(t)$ принадлежат классу периодических (с общим периодом), квазипериодических или почти периодических функций, то найденное решение y принадлежит тому же классу функций (соответственно).

Если обозначить

$$R_n = y_{n+1} + y_{n+2} + \dots,$$

то имеют место оценки

$$|R_n| \leq \bar{f} \frac{\left| \frac{1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{1}{\alpha_2} \right|}{d} \cdot \frac{k^{n+1}}{1-k}$$

и

$$|R_n| \leq \frac{\left| \frac{1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{1}{\alpha_2} \right|}{d(1-k)} \sup |\varphi_1 v'_n + \varphi_2 y_n|.$$

Доказательство. Из оценок леммы 1 следует, если принять обозначения леммы 4,

$$|y_n| \leq \frac{r_n}{d} \left(\left| \frac{1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{1}{\alpha_2} \right| \right).$$

Если выполнено условие теоремы ($k < 1$), то ряд

$$r_1 + r_2 + \dots$$

сходится ввиду доказанного в лемме 4 неравенства

$$r_n \leq k r_{n-1}$$

Отсюда, очевидно, следует равномерная сходимость на $(-\infty, +\infty)$ ряда

$$y = y_0 + y_1 + \dots$$

Факт ограниченности, периодичности, почти или квазипериодичности функции, при соответствующих $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$, $f(t)$, очевиден, если заметить, что, на основании леммы 1, все y_k обладают этими свойствами.

Оценим теперь R_n . Из изложенного выше следует:

$$\begin{aligned} |R_n| &\sim |y_{n+1}| + |y_{n+2}| + \dots \leq \frac{1}{d} \left(\left| \frac{1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{1}{\alpha_2} \right| \right) \times \\ &\times (r_{n+1} + r_{n+2} + \dots) \leq \frac{r_{n+1}}{d} \left(\left| \frac{1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{1}{\alpha_2} \right| \right) (1 + k + k^2 + \dots) = \\ &= \frac{\left| \frac{1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{1}{\alpha_2} \right|}{d(1-k)} r_{n+1}. \end{aligned}$$

Отсюда получаются обе оценки теоремы: первая, если учесть, что

$$r_{n+1} \sim r_0 k^{n+1} = \bar{f} k^{n+1},$$

а вторая из определения

$$r_{n+1} = \sup |\varphi_1 y'_n + \varphi_2 y_n|.$$

З а м е ч а н и я

1. Первая из оценок много грубее второй, но ее удобно использовать для ориентировочной оценки числа членов ряда, необходимого для получения требуемой точности.

Вторая из оценок весьма удобна тем, что определив y_n , мы сразу видим, следует ли на этом остановиться, или продолжать вычисления далее.

В часто встречаемых случаях, когда $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$ и $f(t)$ — тригонометрические полиномы, последовательное определение y_n производится с большим удобством элементарным методом неопределенных коэффициентов. (В этом случае y_n — также тригонометрические полиномы).

2. Полученные результаты дают, между прочим, возможность оценить ошибку, совершаемую при обычной замене переменных

коэффициентов их средним значением; эта ошибка оценивается так

$$|R_1| = f \frac{\left| \frac{1}{\alpha_1} \right| + \left| \frac{1}{\alpha_2} \right|}{d} \cdot \frac{k}{1-k}.$$

3. Все полученные выше оценки могут быть усилены, особенно, если ввести какие либо дополнительные предположения о функциях

$$\varphi_1(t), \varphi_2(t), f(t).$$

Поступила 18/XII 1956 г.

Канд. физ.-мат. наук, доц. С. Г. ГУРЕВИЧ

К РЕШЕНИЮ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНКИ

В нашей работе [1] рассмотрен общий метод решения плоской задачи для прямоугольной области, когда по краям области заданы напряжения. Целью настоящей работы, которую следует считать продолжением работы [1], является показать, что этот же метод может быть применен к решению смешанной задачи следующего типа: по продольным краям прямоугольной области заданы напряжения, а на поперечных краях либо заданы перемещения, либо же на одном краю заданы напряжения, а на другом перемещения. Решение этих задач имеет весьма важное прикладное значение. В дальнейшем, без особых оговорок, мы будем широко пользоваться обозначениями и выводами цитированной выше работы и в ссылках на формулы этой работы будем указывать присвоенный им там номер, не упоминая каждый раз источник. Последнее обстоятельство не вызовет затруднений, поскольку в работе [1] принята нумерация формул двумя числами, а здесь одним.

Представим себе, что на продольных краях прямоугольной области заданы напряжения, т. е. имеют место граничные условия (1-1), а на поперечных краях либо заданы перемещения, либо на одном краю, скажем при $\xi = 0$, заданы напряжения, а на другом перемещения. В таком случае вместо граничных условий (1-2) на поперечных краях имеем:

$$\text{либо} \quad \left. \begin{array}{lll} u = \vartheta_1(\eta), & v = \varphi_1(\eta) & \text{при } \xi = 0; \\ u = \vartheta_2(\eta), & v = \varphi_2(\eta) & \text{при } \xi = c = \frac{l}{h}; \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{lll} \tau_x = F_1(\eta); & \tau = G_1(\eta) & \text{при } \xi = 0; \\ u = \vartheta_2(\eta), & v = \varphi_2(\eta) & \text{при } \xi = c = \frac{l}{h}, \end{array} \right\} \quad (2)$$

где $\theta_j(\eta)$; $\varphi_j(\eta)$; $F_1(\eta)$; $G_1(\eta)$ — заданные, кусочно непрерывные в интервале $0 \leq \eta \leq 1$, функции.

Как показано в работе [1] решения, удовлетворяющие граничным условиям на продольных краях, получаются в результате положения неоднородных решений четырех более простых задач: задачи I групп А, Б и задачи II групп А, Б.

Представляя на основании формул (1-5) — (1-7) перемещения, соответствующие этим решениям в операторной форме, и разлагая затем полученные выражения по степеням оператора Δ , будем иметь:

Задача I групп А и Б

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\mu u'_I}{h} &= - \sum_{m=0}^{\infty} \left[w_{2(m+1)}(\eta) \Delta - 2(1-\nu) \frac{dp_{2m+1}^{(1)}(\eta)}{d\eta} \right] \Delta^m \chi(\xi); \\ \frac{2\mu v'_I}{h} &= \sum_{m=0}^{\infty} \left[r_{2m+1}(\eta) + 2(1-\nu) p_{2m+1}^{(1)}(\eta) \right] \Delta^m \frac{d\chi(\xi)}{d\xi}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Задача II групп А и Б

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\mu u'_{II}}{h} &= - \sum_{m=0}^{\infty} \left[w_{2m+1}(\eta) + 2(1-\nu) p_{2m+1}^{(2)}(\eta) \right] \Delta^m \frac{d\varphi(\xi)}{d\xi}; \\ \frac{2\mu v'_{II}}{h} &= \sum_{m=0}^{\infty} \left[r_{2(m+1)}(\eta) \Delta + 2(1-\nu) \frac{dp_{2m+1}^{(2)}(\eta)}{d\eta} \right] \Delta^m \varphi(\xi); \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

здесь

$$p_{2m+1}^{(j)}(\eta) = \frac{(-1)^m}{(2m+1)!} \left[\eta^{2m+1} - (-1)^j \eta(1-\eta)^{2m+1} \right]_{(j-1,2)} \quad (5)$$

$r_{2m+1}(\eta)$, $w_{2m}(\eta)$ и $r_{2m}(\eta)$, $w_{2m+1}(\eta)$ определяются формулами (1-10) и (1-12), а через μ и ν обозначены коэффициент Ляме и постоянная Пуассона, причем, как известно, в случае плоского напряженного состояния вместо ν нужно взять $\nu^* = \nu/(1+\nu)$.

Функция $\chi(\xi)$ удовлетворяет уравнению (1-6), а функция $\varphi(\xi)$ связана с функцией $\psi(\xi)$, определяемой уравнением (1-8), зависимостью

$$\Delta\varphi = \psi(\xi). \quad (6)$$

Формулы (3), (4) весьма удобны для разыскания перемещений, в случае, если заданные на продольных краях напряжения

являются полиномами. Выражения для перемещений, соответствующие общему случаю, приведены ниже — см. (12), (13).

Граничным условиям на поперечных краях, также как в работе [1], будем удовлетворять с помощью однородных решений. Из равенств (2-6), (2-8) имеем:

задача I групп A и B

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\mu u''_I}{h} &= -2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_1(q_n, \eta)}{q_n^3} \frac{dg_n(\xi)}{d\xi}; \\ \frac{2\mu v''_I}{h} &= 2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{v_1(q_n, \eta)}{q_n} g_n(\xi). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

задача II групп A и B

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\mu u''_{II}}{h} &= -2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_2(q_n, \eta)}{q_n^2} \frac{dh_n(\xi)}{d\xi}; \\ \frac{2\mu v''_{II}}{h} &= -2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{v_2(q_n, \eta)}{q_n} h_n(\xi), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где

$$\left. \begin{aligned} g_n(\xi) &= A_n e^{-q_n \xi} + B_n e^{-q_n(c-\xi)}; \\ h_n(\xi) &= C_n e^{-q_n \xi} + D_n e^{-q_n(c-\xi)}; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} u_2(q_n, \eta) &= \sigma_{y1}(q_n, \eta) - 2(1-\nu)c_1(q_n, \eta); \\ v_1(q_n, \eta) &= \tau_1(q_n, \eta) + 2(1-\nu)s_1(q_n, \eta); \\ u_2(q_n, \eta) &= \sigma_{y2}(q_n, \eta) + 2(1-\nu)s_2(q_n, \eta); \\ v_2(q_n, \eta) &= \tau_2(q_n, \eta) - 2(1-\nu)c_2(q_n, \eta); \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

причем

$$\left. \begin{aligned} c_j(q_n, \eta) &= \cos q_n \eta + (-1)^j \gamma \cos q_n(1-\eta); \\ s_j(q_n, \eta) &= \sin q_n \eta - (-1)^j \gamma \sin q_n(1-\eta); \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

($j = 1, 2$),

а функции σ_{yj} , τ_j определяются формулами (2-7), (2-9).

Опираясь на (3-7), (3-19) можно выразить теперь перемещения, соответствующие неоднородным решениям всех четырех за-

дач, в виде рядов, зависящих от функции (10), сначала для случая нагружения продольных краев сосредоточенными в точке $\xi = \alpha$ единичными силами¹, а затем интегрированием и для общего случая.

Окончательно эти выражения можно представить в виде:

Задача I групп A и B

$$\begin{aligned}
 \frac{2 \mu u'_I}{h} = & 2 \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_1(q_n, \gamma)}{(\cos q_n - \gamma) q_n} \times \\
 & \times \left[e^{-q_n \xi} \int_0^{\xi} e^{q_n \alpha} t_j(x) dx + e^{q_n \xi} \int_{\xi}^c e^{-q_n x} t_j(x) dx \right] + \\
 & + \left\{ \begin{aligned} & 3(1-\nu)(1-2\gamma) \left[\xi \int_0^{\xi} t_1(x) dx - \int_{\xi}^c (\xi - 2x) t_1(x) dx \right]; \\ & (1-\nu) \left[-\xi \int_0^{\xi} t_2(x) dx + \int_{\xi}^c (\xi - 2x) t_2(x) dx \right]; \end{aligned} \right. \\
 \frac{2 \mu v'_I}{h} = & 2 \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{v_1(q_n, \gamma)}{(\cos q_n - \gamma) q_n} \times \\
 & \times \left[-e^{-q_n \xi} \int_0^{\xi} e^{q_n \alpha} t_j(x) dx + e^{q_n \xi} \int_{\xi}^c e^{-q_n x} t_j(x) dx \right] + \\
 & + \left\{ \begin{aligned} & [3(1-\nu)\xi^2 - 3\nu\gamma(1-\gamma)] \left[\int_0^{\xi} t_1(x) dx - \int_{\xi}^c t_1(x) dx \right] - \\ & - \int_{\xi}^c \left[3(1-\nu) \left(2x^2 - 4x\xi + \frac{7}{15} \right) + 1 \right] t_1(x) dx; \\ & \nu\gamma \int_0^{\xi} t_2(x) dx + \nu(1-\gamma) \int_{\xi}^c t_2(x) dx; \quad (j=1,2). \end{aligned} \right.
 \end{aligned} \quad (12)$$

¹ Алгебраические части разложений для этого случая получаются интегрированием членов стоящих вне знака суммы в соответствующих выражениях для напряжений и последующим определением постоянных интегрирования из условий непрерывности перемещений в сечении $\xi = \alpha$.

Задача II групп А и Б

$$\begin{aligned}
\frac{2\mu u'_{II}}{h} &= 2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_2(q_n, \gamma)}{(\cos q_n - \gamma)q_n} \times \\
&\times \left[e^{-q_n \xi} \int_0^{\xi} e^{q_n \alpha} s_j(\alpha) d\alpha - e^{q_n \xi} \int_{\xi}^c e^{-q_n \alpha} s(\alpha) d\alpha \right] + \\
&+ \left\{ \begin{aligned} &3(1-2\gamma)(1-\nu) \left[\xi \int_0^{\xi} (\xi-2\alpha) t_1(\alpha) d\alpha + \int_{\xi}^c (2\alpha\xi - \xi^2 - 2\alpha^2) t_1(\alpha) d\alpha \right] - \\ &- \gamma^2(3-2\gamma)(2-\nu) \left[\int_0^{\xi} t_1(\alpha) d\alpha - \int_{\xi}^c t_1(\alpha) d\alpha \right] - \\ &- \left[(1-\nu)(4,8\gamma - 1,4) + 1 \right] \int_{\xi}^c t_1(\alpha) d\alpha; \\ &- \nu \int_0^{\xi} t_2(\alpha) d\alpha; \end{aligned} \right\} \quad (13) \\
\frac{2\mu v'_{II}}{h} &= -2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{v_2(q_n, \gamma)}{(\cos q_n - \gamma)q_n} \times \\
&\times \left[e^{-q_n \xi} \int_0^{\xi} e^{q_n \alpha} s_j(\alpha) d\alpha + e^{q_n \xi} \int_{\xi}^c e^{-q_n \alpha} s_j(\alpha) d\alpha \right] + \\
&+ \left\{ \begin{aligned} &-6\gamma(1-\gamma)\nu \left[\int_0^{\xi} (\xi-\alpha) s_1(\alpha) d\alpha + \int_{\xi}^c (\alpha-\xi) s_1(\alpha) d\alpha \right] + \\ &+ 2(1-\nu) \left[\xi^2 \int_0^{\xi} (\xi-3\alpha) s_1(\alpha) d\alpha + \right. \\ &\left. + \int_{\xi}^c \left[-6\alpha^2\xi + 3\alpha\xi^2 - \xi^3 + 2\alpha^3 + 2,4(\xi-\alpha) \right] s_1(\alpha) d\alpha; \right. \\ &0 \qquad \qquad \qquad (j=1,2) \end{aligned} \right\}
\end{aligned}$$

При подсчете перемещений по этим формулам в точках разрыва непрерывности функций $t_j(\alpha)$, $s_j(\alpha)$ могут появиться осо-

бенности в виде медленно сходящихся и даже расходящихся рядов, типа:

$$2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_j(q_n, \tau_1)}{(\cos q_n - \gamma)q_n^s}, \quad 2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{v_j(q_n, \tau_1)}{(\cos q_n - \gamma)q_n^s} \quad (j=1,2),$$

с которыми следует поступить совершенно так же, как с аналогичными рядами, встречающимися при вычислении напряжений. При этом, учитывая (3-11), (3-14), (3-17)—(3-21), достаточно привести относящиеся сюда формулы для рядов типа:

$$2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{s_j(q_n, \tau_1)}{(\cos q_n - \gamma)q_n^s}, \quad (14)$$

$$2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_j(q_n, \tau_1)}{(\cos q_n - \gamma)q_n^s}; \quad (j=1,2). \quad (15)$$

С помощью теории вычетов совершенно так же, как в работе [1], имеем:

$$\begin{aligned} & 4\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{s_j(q_n, \tau_1)q_n}{\cos q_n - \gamma} \lambda_n^{(2m+1)} = \\ & = p_{2m+1}^{(j)}(\tau_1) - (-1)^m \frac{l_{2m+3}}{l_3} \left\{ p_1^{(j)}(\tau_1) \right. \\ & \left. 4\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_j(q_n, \tau_1)q_n^2}{\cos q_n - \gamma} \lambda_n^{(2m+1)} = \right\} \quad (16) \\ & = \frac{dp_{2m+1}^{(j)}(\tau_1)}{d\tau_1} - (-1)^m \frac{l_{2m+3}}{l_3} \left\{ \frac{dp_1^{(j)}(\tau_1)}{d\tau_1} \right\}, \end{aligned}$$

где величины l_{2m+1} и $\lambda_n^{(2m+1)}$ определяются соответственно (3-13) и (3-15), а $p_{2m+1}^{(j)}(\tau_1)$ — формулами (5).

Таким образом, соотношения (16) дают возможность просуммировать ряды (14) при s нечетном и ряды (15) при s чет-

ном, выразив их в виде полиномов. При $s \geq 4$ ряды (14), (15) сходятся весьма быстро, а для остальных значений s при подсчете этих рядов следует пользоваться соотношениями:

для задач группы А:

$$\begin{aligned}
 2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{s_j(q_n, \tau_1)}{(\cos q_n - 1)q_n^2} &= \frac{2}{3\pi} \int_0^{\infty} \frac{\rho_j(\lambda, \tau_1)(1 - \cos \lambda \xi)^2}{(\operatorname{sh} \lambda - \lambda) \lambda^2} d\lambda + \\
 &+ \frac{12}{3} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \left[4e^{-3q_n} - e^{-23q_n} \right] \frac{s_j(q_n, \tau_1)}{(\cos q_n - 1)q_n^2} - \\
 &- \frac{2}{3} \beta^3 p_1^{(j)}(\tau_1) - \frac{1}{3} \beta \frac{dQ_j^{(\tau_1)}}{d\tau_1}; \\
 2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_j(q_n, \tau_1)}{(\cos q_n - 1)q_n} &= \frac{2}{3\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega_j(\lambda, \tau_1)(1 - \cos \lambda \xi)^2}{(\operatorname{sh} \lambda - \lambda) \lambda} d\lambda + \\
 &+ \frac{1}{3} \cdot 2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \left[4e^{-3q_n} - e^{-23q_n} \right] \frac{c_j(q_n, \tau_1)}{(\cos q_n - 1)q_n} - \\
 &- \frac{2}{3} \beta^3 \frac{dp^{(j)}(\tau_1)}{d\tau_1} - \frac{1}{3} \frac{d^2 Q_j^{(\tau_1)}}{d\tau_1^2}; \quad \left. \vphantom{\sum_{n=1}^{\infty}} \right\} (17) \\
 2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_j(q_n, \tau_1)}{(\cos q_n - 1)q_n^3} &= -\frac{0,4}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega_j(\lambda, \tau_1)(1 - \cos \lambda \xi)^3}{(\operatorname{sh} \lambda - \lambda) \lambda^3} d\lambda + \\
 &+ 0,1 \cdot 2\operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \left[15e^{-3q_n} - 6e^{-23q_n} + e^{-33q_n} \right] \times \\
 &\times \frac{c_j(q_n, \tau_1)}{(\cos q_n - 1)q_n^3} + 0,165 \beta^5 \frac{dp_1^{(j)}(\tau_1)}{d\tau_1} + \\
 &+ 0,05 \beta^3 \frac{d^2 Q_j^{(\tau_1)}}{d\tau_1^2} + 0,3 \beta Q_j(\tau_1); \\
 &\quad (j=1,2);
 \end{aligned}$$

для задач группы Б:

$$\begin{aligned}
 2 \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{s_i(q_n, \tau_i)}{(\cos q_n + 1)q_n^2} &= -\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\rho_i(\lambda, \tau_i)(1 - \cos \lambda \beta)}{(\operatorname{sh} \lambda + \lambda)\lambda^2} d\lambda \\
 &+ 2 \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{s_i(q_n, \tau_i)}{(\cos q_n + 1)q_n^2} e^{-q_n \beta} - \frac{\beta}{4} \rho_1^{(j)}(\tau_i); \\
 2 \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_j(q_n, \tau_i)}{(\cos q_n + 1)q_n} &= -\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega_j(\lambda, \tau_i)(1 - \cos \lambda \beta)}{(\operatorname{sh} \lambda + \lambda)\lambda} d\lambda \\
 &+ 2 \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_j(q_n, \tau_i)}{(\cos q_n + 1)q_n} e^{-q_n \beta} - \frac{\beta}{4} \frac{dp_1^{(j)}(\tau_i)}{d\tau_i}; \\
 2 \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_j(q_n, \tau_i)}{(\cos q_n + 1)q_n^3} &= -\frac{1}{3\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega_j(\lambda, \tau_i)(1 - \cos \lambda \beta)^2}{(\operatorname{sh} \lambda + \lambda)\lambda^3} d\lambda \\
 &+ \frac{1}{3} \cdot 2 \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \left[4e^{-q_n \beta} - e^{-2q_n \beta} \right] \frac{c_j(q_n, \tau_i)}{(\cos q_n + 1)q_n^3} + \\
 &+ \frac{\beta^3}{18} \frac{dp_1^{(j)}(\tau_i)}{d\tau_i} + \frac{\beta}{3} Q_j(\tau_i); \quad (j = 1, 2);
 \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$\begin{aligned}
 \rho_j(\lambda, \tau_i) &= \operatorname{sh} \lambda \tau_i - (-1)^j \operatorname{sh} \lambda (1 - \tau_i); \\
 \omega_j(\lambda, \tau_i) &= \operatorname{ch} \lambda \tau_i + (-1)^j \operatorname{ch} \lambda (1 - \tau_i);
 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 Q_j(\tau_i) &= 4 \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{c_j(q_n, \tau_i)}{(\cos q_n - \tau_i)q_n^2} = \\
 &= \begin{cases} \frac{1}{20} \left(5\tau_i^4 - 3\tau_i^2 + \frac{11}{7} \right) + \frac{(-1)^j}{20} \left(5\tau_i^4 - 20\tau_i^3 + 27\tau_i^2 - 14\tau_i + \frac{15,1}{7} \right) \\ \frac{1}{4} \left(\tau_i^2 - \frac{1}{6} \right) - \frac{(-1)^j}{4} \left(\tau_i^2 - 2\tau_i + \frac{5}{6} \right); \end{cases} \\
 &\quad (j = 1, 2).
 \end{aligned}$$

Правые части равенств (17) и (18) не зависят от величины параметра β , поэтому, придавая β какое нибудь значение большее единицы, мы можем без большой погрешности в правых частях этих равенств откинуть все суммы.

Обратимся теперь к рассмотрению граничных условий (1).
В соответствии с тем, что однородные решения групп А и Б ведут себя по-разному в отношении симметрии по переменному η , разобьем заданные на поперечных краях функции $\vartheta_j(\eta)$, $\varphi_j(\eta)$ на две части:

симметричные — $\vartheta_j^\circ(\eta)$, $\varphi_j^\circ(\eta)$ и
антисимметричные — $\vartheta_j^*(\eta)$, $\varphi_j^*(\eta)$,
положив

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_j^\circ &= \frac{1}{2} [\vartheta_j(\eta) + \vartheta_j(1-\eta)], & \varphi_j^\circ &= \frac{1}{2} [\varphi_j(\eta) + \varphi_j(1-\eta)]; \\ \vartheta_j^* &= \frac{1}{2} [\vartheta_j(\eta) - \vartheta_j(1-\eta)], & \varphi_j^* &= \frac{1}{2} [\varphi_j(\eta) - \varphi_j(1-\eta)], \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

и подчиним произвольные постоянные, входящие в однородные решения каждой из четырех задач, равенствам.

Задача I групп А и Б:

$$\left. \begin{aligned} u_I' + u_I'' &= 0, & v_I' + v_I'' &= 0 & \text{при } \xi &= 0 \\ u_I' + u_I'' &= 0, & v_I' + v_I'' &= 0 & \text{при } \xi &= c \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Задача II групп А и Б:

$$\left. \begin{aligned} u_{II}' + u_{II}'' &= \begin{cases} \vartheta_1^* \\ \vartheta_1^\circ \end{cases}, & v_{II}' + v_{II}'' &= \begin{cases} \varphi_1^\circ \\ \varphi_1^* \end{cases}, & \text{при } \xi &= 0 \\ u_{II}' + u_{II}'' &= \begin{cases} \vartheta_2^* \\ \vartheta_2^\circ \end{cases}, & v_{II}' + v_{II}'' &= \begin{cases} \varphi_2^\circ \\ \varphi_2^* \end{cases}, & \text{при } \xi &= c \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Отсюда видно, что в результате наложения однородных и неоднородных решений всех четырех задач будут удовлетворены все граничные условия, рассматриваемой смешанной задачи. Для определения произвольных постоянных из условий (21), (22), так же как и в работе [1], применим метод наименьших квадратов в комбинации с методом последовательных приближений. Так, подставляя в граничные условия (21) выражения (7) и пренебрегая при этом в первом приближении членами, содержащими множитель $e^{-q_n c}$ и составляя затем обычным путем алгебраическую

систему уравнений метода наименьших квадратов, после некоторых преобразований, получим¹

$$\sum_{n=1}^{\infty} [A_n' I(q_n, q_k) + \bar{A}_n' I(\bar{q}_n, q_k)] = H_k; \quad (23)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} [B_n' I(q_n, q_k) + \bar{B}_n' I(\bar{q}_n, q_k)] = N_k, \quad (24)$$

где

$$A_n' = \frac{A_n}{\cos q_n + \gamma}, \quad B_n' = \frac{B_n}{\cos q_n + \gamma}, \quad (25)$$

$$I(q_n, q_k) = \int_0^1 [u_2(q_n, \gamma) u_2(q_k, \gamma) + v_2(q_n, \gamma) v_2(q_k, \gamma)] d\gamma; \quad (26)$$

$$H_k = -\frac{2\gamma}{h} \frac{\cos q_k + \gamma}{q_k} \int_0^1 [u_1'(0) u_1(q_k, \gamma) + v_1'(0) v_1(q_k, \gamma)] d\gamma; \quad (27)$$

$$N_k = -\frac{2\gamma}{h} \frac{\cos q_k + \gamma}{q_k} \int_0^1 [u_1'(c) u_1(q_k, \gamma) - v_1'(c) v_1(q_k, \gamma)] d\gamma. \quad (28)$$

Подставляя под знак интеграла (26) выражения (10), получим

$$\left. \begin{aligned} I(q_n, q_k) = J_{nk} + \frac{8(1-\gamma)^2 \gamma (1+\gamma \cos q_n)(1+\gamma \cos q_k)}{\cos q_n + \cos q_k} - \\ - \frac{8(1-\gamma)^2 \gamma q_n q_k}{\cos q_n + \cos q_k}; \\ (n \neq k) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$I(q_n, q_n) = J_{nn} + 8(1-\gamma)^2 (1 + \gamma \cos q_n),$$

где $J_{n,k}$ табулированные величины, определяемые формулами (5-8). Отделяя в уравнениях (23) вещественную и мнимую части, будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} A_n' r (I_{nk}^r + \tilde{I}_{nk}^r) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n' i (\tilde{I}_{nk}^i - I_{nk}^i) = H_k^r; \\ \sum_{n=1}^{\infty} A_n' r (I_{nk}^i + \tilde{I}_{nk}^i) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n' i (I_{nk}^r - \tilde{I}_{nk}^r) = H_k^i, \\ (\kappa = 1, 2, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

¹ При выводе учтено равенство, справедливое при любых q_n, q_k :

$$\int_0^1 [u_1(q_n, \gamma) u_1(q_k, \gamma) + v_1(q_n, \gamma) v_1(q_k, \gamma)] d\gamma = \frac{(\cos q_n - \gamma)(\cos q_k - \gamma) I(q_n, q_k)}{q_n q_k}.$$

где обозначено:

$$\left. \begin{aligned} I(q_n, q_k) &= I_{nk}' + i I_{nk}^i; \quad I(\bar{q}_n, q_k) = \bar{I}_{nk}' + i \bar{I}_{nk}^i; \\ A_n' &= A_n'^r + i A_n'^i, \quad H_k = H_k^r + i H_k^i. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Из этой же системы уравнений (30) будут определяться постоянные $B_n' = B_n'^r + i B_n'^i$ с той лишь разницей, что в правой части вместо H_k^r, H_k^i будут стоять постоянные N_k^r, N_k^i , представляющие вещественную и мнимую части величин (28).

Граничные условия (22) также приводят к системе (30) для постоянных

$$C_n' = \frac{C_n}{q_n}, \quad \text{и} \quad D_n' = \frac{D_n}{q_n},$$

причем в правых частях этой системы будут соответственно стоять вещественные и мнимые части величин

$$\left. \begin{aligned} H_k &= \frac{2\mu}{h} \int_0^1 \left\{ \left[\begin{array}{c} \vartheta_1^* \\ \vartheta_1^0 \end{array} - u_{II}'(0) \right] u_2(q_k, \eta) - \right. \\ &\quad \left. - \left[\begin{array}{c} \varphi_1^0 \\ \varphi_1^* \end{array} - v_{II}'(0) \right] v_2(q_k, \eta) \right\} d\eta; \\ N_k &= - \frac{2\mu}{h} \int_0^1 \left\{ \left[\begin{array}{c} \vartheta_2^* \\ \vartheta_2^0 \end{array} - u_{II}'(c) \right] u_2(q_k, \eta) + \right. \\ &\quad \left. + \left[\begin{array}{c} \varphi_2^0 \\ \varphi_2^* \end{array} - v_{II}'(c) \right] v_2(q_k, \eta) \right\} d\eta. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

Таким образом, условия (21) (22) сводятся к бесконечным системам (30) всего лишь двух типов: один для задач группы А, другой — для задач группы Б. Выражения (27), (28), (32), определяющие величины H_k, N_k , с помощью преобразования указанного в работе [1], всегда можно освободить от особенностей, если таковые там имеются, и выразить их, таким образом, в виде быстро сходящихся рядов, зависящих от величин

$$\begin{aligned} \frac{q_k \int_0^1 u_1(q_n, \eta) u_1(q_k, \eta) d\eta}{(\cos q_n - \gamma)(\cos q_k - \gamma) q_n} &= - \frac{\Phi(q_n, q_k)}{\cos q_n + \gamma} - \frac{8 \sqrt{(1 - \gamma) q_k}}{(\cos q_n + \cos q_k) q_n}; \\ \frac{\int_0^1 u_1^2(q_n, \eta) d\eta}{(\cos q_n - \gamma)^2} &= 2(1 - \gamma) - \frac{\gamma}{6} (\cos q_n + 4 \gamma); \end{aligned} \quad (n \neq k)$$

$$\frac{\int_0^1 u_2(q_n, \tau_i) u_2(q_k, \tau_i) d\tau_i}{(\cos q_n - \gamma) q_n} = \frac{\Phi(q_n, q_k)}{q_n} - \frac{8\gamma(1-\gamma)q_k}{(\cos q_n + \cos q_k)(\cos q_n - \gamma)}; \\ (n \neq k)$$

$$\frac{\int_0^1 u_2^2(q_n, \tau_i) d\tau_i}{(\cos q_n - \gamma) q_n} = -\frac{2\gamma q_n}{\cos q_n - \gamma} + \frac{\Phi(q_n, q_n)}{q_n};$$

$$\frac{q_k \int_0^1 v_1(q_n, \tau_i) v_1(q_k, \tau_i) d\tau_i}{(\cos q_k - \gamma)(\cos q_n - \gamma) q_n} = -\frac{\Gamma(q_n, q_k)}{\cos q_n + \gamma} - \frac{8(1-\gamma)^2 \gamma (\cos q_k + \gamma)}{(\cos q_n + \cos q_k)(\cos q_n - \gamma)}; \\ n \neq k$$

$$\frac{\int_0^1 v_1^2(q_n, \tau_i) d\tau_i}{(\cos q_n - \gamma)^2} = -2(1-\gamma) - \frac{8(1-\gamma)^2 \gamma}{\cos q_n - \gamma} - \frac{\gamma}{6} (\cos q_n - 2\gamma);$$

$$\frac{\int_0^1 v_2(q_n, \tau_i) v_2(q_k, \tau_i) d\tau_i}{(\cos q_n - \gamma) q_n} = \frac{\Gamma(q_n, q_k)}{q_n} + \frac{8(1-\gamma)^2 \gamma (\cos q_n + \gamma)(\cos q_k + \gamma)}{(\cos q_n + \cos q_k)(\cos q_n - \gamma) q_n}; \\ (n \neq k)$$

$$\frac{\int_0^1 v_2^2(q_n, \tau_i) d\tau_i}{(\cos q_n - \gamma) q_n} = -\frac{2(1-\gamma)q_n}{\cos q_n - \gamma} + \frac{8(1-\gamma)^2 \gamma (\cos q_n + \gamma)}{(\cos q_n - \gamma) q_n} + \frac{\Gamma(q_n, q_n)}{q_n} *.$$

Что же касается граничных условий (2), то они не требуют специального рассмотрения, так как очевидно, что на краю $\xi = 0$ они приводят к системе (5-10), а на краю $\xi = c$ — к системе (30).

Подводя итог изложенному выше, отметим, что полученное приближенное решение сравнительно легко протабулировать, благодаря чему становится возможным рассмотрение любой конкретной задачи довольно просто доводить до числового результата. Для этого к таблицам работ [1], [2] нужно, во-первых, присоединить таблицы функций (11); во-вторых, усекая систему (30), ограничиваясь при этом, например, случаем $n = 5$, $k = 5$, нужно вычислить коэффициенты этой усеченной системы и по ним найти элементы обратной матрицы; в третьих, нужно вычислить величины (33).

В заключение заметим, что рассмотренные выше задачи исследовал В. К. Прокопов [3], [4]. Автор удовлетворяет условиям (1) (2) точно, что, как показывают отдельные примеры, при малом числе точек не дает удовлетворительных результатов. Кроме того, как нам кажется, его решение сложнее табулировать.

* Величины $\Phi(q_n, q_k)$, $\Gamma(q_n, q_k)$ табулированы и их значения помещены в табл. 9, 10 работы [1] и 7, 8 работы [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Гуревич, Распределение напряжения в прямоугольной пластинке, Известия ЛЭТИ, вып. XXVII, 1955.
2. С. Г. Гуревич, Решение плоской задачи для прямоугольной области, нагруженной по краям нормальными усилиями и применение ее к расчету фланцевых соединений, Прочность элементов паровых турбин, Сборник статей, Машгиз, 1951.
3. В. К. Прокопов, Об одной плоской задаче теории упругости для прямоугольной области, ПММ, вып. I, 1952.
4. В. К. Прокопов, Задача о стесненном изгибе прямоугольной полосы, Инженерный сборник, т. XI, 1952.

Поступила 14/IV 1955 г.

Ассистент О. К. ЗЕВАХИН

**ИЗГИБ КОНСОЛИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ,
СОСТАВЛЕННОЙ ИЗ ТРЕХ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-
ИЗОТРОПНЫХ СЛОЕВ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОПЕРЕЧНОЙ
СИЛЫ, ПРИЛОЖЕННОЙ К НЕЗАКРЕПЛЕННОМУ КОНЦУ**

Предположим, что мы имеем консоль прямоугольного поперечного сечения, составленную путем склеивания трех однородных трансверсально-изотропных слоев и находящуюся под действием силы P , которая приложена к незакрепленному концу и направлена вдоль оси симметрии концевой сечения, перпендикулярной к плоскостям склеивания¹. Предположим, кроме того, что поперечные сечения всех слоев консоли расположены в плоскостях изотропии и что высота наружных слоев и их упругие постоянные одинаковы. Оси симметрии концевой сечения среднего слоя (на незакрепленном конце) примем за оси x и y прямоугольной декартовой системы координат, а ось этого слоя консоли — за ось z .

Размеры указаны на рис. 1.

Идя от решения соответствующей задачи для цельной консоли [1], ищем решение поставленной задачи об изгибе составной консоли в следующем виде.

а) В среднем слое $\Omega_0 (-a \leq x \leq a, -h_0 \leq y \leq h_0, 0 \leq z \leq l)$.

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xz}^{(0)} = \tau_{yz}^{(0)} = \tau_{xy}^{(0)} = 0, \quad \tau_z^{(0)} = C_0^{(0)} yz, \\ \tau_{xz}^{(0)} = \frac{\partial \Psi_0}{\partial y}, \quad \tau_{yz}^{(0)} = -\frac{\partial \Psi_0}{\partial x} - \frac{1}{2} C_0^{(0)} (y^2 - h_1^2) + D, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

¹ Клеевая прослойка рассматривается не как самостоятельный слой, а как соединительная пленка.

где $C_0^{(0)}$ и D — неизвестные постоянные, подлежащие определению, а Ψ_0 — функция от x и y , удовлетворяющая дифференциальному уравнению

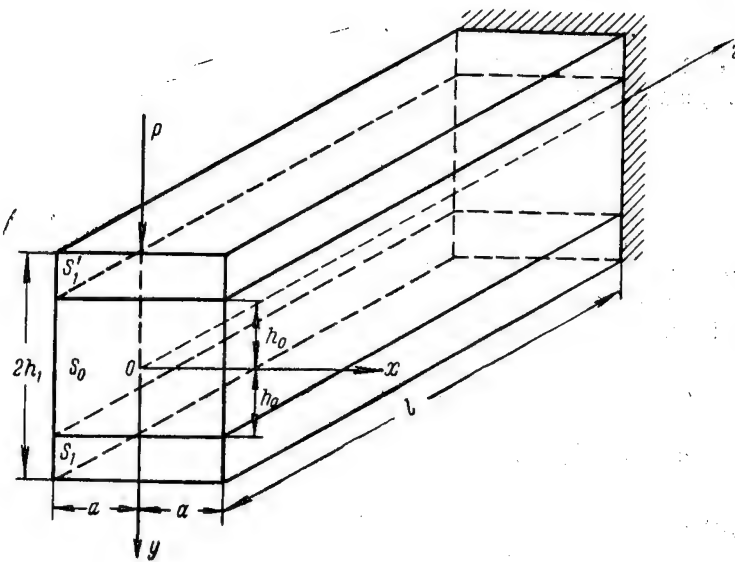


Рис. 1

$$\frac{\partial^2 \Psi_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_0}{\partial y^2} = - \frac{2C_0^{(0)} \nu^{(0)} G^{(0)}}{E^{(0)}} x, \quad (2)$$

в котором $\nu^{(0)}$, $E^{(0)}$, $G^{(0)}$ — так называемые технические постоянные среднего слоя, а именно:

- $\nu^{(0)}$ — коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости изотропии при растяжении в направлении, перпендикулярном к этой плоскости;
- $E^{(0)}$ — модуль Юнга для растяжения или сжатия по направлению, перпендикулярному к плоскости изотропии;
- $G^{(0)}$ — модуль сдвига для плоскостей, перпендикулярных к плоскости изотропии.

б) В наружном слое $\Omega_1 (-a \leq x \leq a, h_0 \leq y \leq h_1, 0 \leq z \leq l)$.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^{(1)} = \sigma_y^{(1)} = \tau_{xy}^{(1)} = 0, \quad \sigma_z^{(1)} &= C_0^{(1)} yz, \\ \tau_{xz}^{(1)} = \frac{\partial \Psi_1^{(1)}}{\partial y}, \quad \tau_{yz}^{(1)} &= -\frac{\partial \Psi_1^{(1)}}{\partial x} - \frac{1}{2} C_0^{(1)} (y^2 - h_1^2), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

причем $C_0^{(1)}$ — неизвестная постоянная, а $\Psi_1 = \Psi_1(x, y)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$-\frac{\partial^2 \Psi_1^{(1)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_1^{(1)}}{\partial y^2} = -\frac{2C_0^{(1)} \nu^{(1)} G^{(1)}}{E^{(1)}} x, \quad (4)$$

в котором $\nu^{(1)}, E^{(1)}, G^{(1)}$ — технические постоянные наружных слоев, соответствующие техническим постоянным среднего слоя.

в) В наружном слое $\Omega_1' (-a \leq x \leq a, -h_1 \leq y \leq -h_0, 0 \leq z \leq l)$:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x^{(1')} = \sigma_y^{(1')} = \tau_{xy}^{(1')} = 0, \quad \sigma_z^{(1')} &= C_0^{(1')} yz, \\ \tau_{xz}^{(1')} = \frac{\partial \Psi_1'^{(1')}}{\partial y}, \quad \tau_{yz}^{(1')} &= -\frac{\partial \Psi_1'^{(1')}}{\partial x} - \frac{1}{2} C_0^{(1')} (y^2 - h_1^2), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $C_0^{(1')}$ — неизвестная постоянная, а $\Psi_1' = \Psi_1'(x, y)$ — функция от x и y , удовлетворяющая дифференциальному уравнению

$$-\frac{\partial^2 \Psi_1'^{(1')}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_1'^{(1')}}{\partial y^2} = -\frac{2C_0^{(1')} \nu^{(1')} G^{(1')}}{E^{(1')}} x. \quad (6)$$

Граничные условия в данной задаче состоят в следующем.

На верхней, нижней и боковых гранях касательные напряжения отсутствуют:

1. При $x = \pm a$ $\tau_{xz}^{(0)} = \tau_{xz}^{(1)} = \tau_{xz}^{(1')} = 0$ ($\Psi_0 = \Psi_1 = \Psi_1' = 0$).

2. При $y = h_1$ $\tau_{yz}^{(1)} = 0$ ($\Psi_1 = 0$).

3. При $y = -h_1$ $\tau_{yz}^{(1')} = 0$ ($\Psi_1' = 0$).

На границе слоев напряжения и смещения должны быть непрерывными:

4. При $y = h_0$:

а) $\tau_{yz}^{(1)} = \tau_{yz}^{(0)}$,

б) $u_1 = u_0, v_1 = v_0, w_1 = w_0$.

5. При $y = -h_0$:

$$а) \tau_{yz}^{(1')} = \tau_{yz}^{(0)},$$

$$б) u_1' = u_0, \quad v_1' = v_0, \quad w_1' = w_0.$$

6. Условиям для напряжений в концевых сечениях удовлетворим приближенно, потребовав, чтобы:

$$а) \iint_{(s_0)} \tau_{xz}^{(0)} dx dy + \iint_{(s_1)} \tau_{xz}^{(1)} dx dy + \iint_{(s_1')} \tau_{xz}^{(1')} dx dy = 0,$$

$$б) \iint_{(s_0)} \tau_{yz}^{(0)} dx dy + \iint_{(s_1)} \tau_{yz}^{(1)} dx dy + \iint_{(s_1')} \tau_{yz}^{(1')} dx dy = -P,$$

$$в) \iint_{(s_0)} \sigma_z^{(0)} dx dy + \iint_{(s_1)} \sigma_z^{(1)} dx dy + \iint_{(s_1')} \sigma_z^{(1')} dx dy = 0,$$

$$г) \iint_{(s_0)} \sigma_z^{(0)} y dx dy + \iint_{(s_1)} \sigma_z^{(1)} y dx dy + \iint_{(s_1')} \sigma_z^{(1')} y dx dy =$$

$$= \begin{cases} 0 & \text{при } z = 0, \\ -Pl & \text{при } z = l, \end{cases}$$

$$д) \iint_{(s_0)} \sigma_z^{(0)} x dx dy + \iint_{(s_1)} \sigma_z^{(1)} x dx dy + \iint_{(s_1')} \sigma_z^{(1')} x dx dy = 0,$$

$$е) \iint_{(s_0)} (\tau_{yz}^{(0)} x - \tau_{xz}^{(0)} y) dx dy + \iint_{(s_1)} (\tau_{yz}^{(1)} x - \tau_{xz}^{(1)} y) dx dy +$$

$$+ \iint_{(s_1')} (\tau_{yz}^{(1')} x - \tau_{xz}^{(1')} y) dx dy = 0.$$

7. Смещения на закрепленном конце должны удовлетворять условиям:

при $x = y = 0$ и $z = l$

$$u_0 = v_0 = w_0 = 0,$$

$$\frac{\partial u_0}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial v_0}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial v_0}{\partial x} - \frac{\partial u_0}{\partial y} = 0.$$

Из граничного условия 6в следует, что

$$C_0^{(1')} = C_0^{(1)}. \quad (7)$$

Учитывая последнее равенство, мы в дальнейшем не будем отличать друг от друга эти коэффициенты и отбросим штрих у $C_0^{(1')}$.

Решения, удовлетворяющие соответственно (2), (4) и (6), имеют в следующей форме:

$$\Psi_0 = \sum_{k=1}^{\infty} \left[A_{0k} \operatorname{sh} \frac{k\pi y}{a} + B_{0k} \operatorname{ch} \frac{k\pi y}{a} - \frac{4C_0^{(0)} a^3 G^{(0)} y^{(0)}}{\pi E^{(0)}} \cdot \frac{(-1)^k}{k^3} \right] \sin \frac{k\pi x}{a}, \quad (8)$$

$$\Psi_1 = \sum_{k=1}^{\infty} \left[A_{1k} \operatorname{sh} \frac{k\pi y}{a} + B_{1k} \operatorname{ch} \frac{k\pi y}{a} - \frac{4C_0^{(1)} a^3 G^{(1)} y^{(1)}}{\pi E^{(1)}} \cdot \frac{(-1)^k}{k^3} \right] \sin \frac{k\pi x}{a}, \quad (9)$$

$$\Psi_1' = \sum_{k=1}^{\infty} \left[A'_{1k} \operatorname{sh} \frac{k\pi y}{a} + B'_{1k} \operatorname{ch} \frac{k\pi y}{a} - \frac{4C_0^{(1)} a^3 G^{(1)} y^{(1)}}{\pi E^{(1)}} \cdot \frac{(-1)^k}{k^3} \right] \sin \frac{k\pi x}{a}, \quad (10)$$

где A_{0k} , B_{0k} , A_{1k} , B_{1k} , A'_{1k} , B'_{1k} — неизвестные постоянные, которые определяются из граничных условий.

Касательные напряжения принимают вид:

$$\tau_{xz}^{(0)} = \frac{\partial \Psi_0}{\partial y} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k\pi}{a} \left[A_{0k} \operatorname{ch} \frac{k\pi y}{a} + B_{0k} \operatorname{sh} \frac{k\pi y}{a} \right] \sin \frac{k\pi x}{a}, \quad (11)$$

$$\tau_{xz}^{(1)} = \frac{\partial \Psi_1}{\partial y} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k\pi}{a} \left[A_{1k} \operatorname{ch} \frac{k\pi y}{a} + B_{1k} \operatorname{sh} \frac{k\pi y}{a} \right] \sin \frac{k\pi x}{a}, \quad (12)$$

$$\tau_{xz}^{(1')} = \frac{\partial \Psi_1'}{\partial y} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k\pi}{a} \left[A'_{1k} \operatorname{ch} \frac{k\pi y}{a} + B'_{1k} \operatorname{sh} \frac{k\pi y}{a} \right] \sin \frac{k\pi x}{a}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \tau_{yz}^{(0)} &= -\frac{\partial \Psi_0}{\partial x} - \frac{1}{2} C_0^{(0)} (y^2 - h_1^2) + D = \\ &= -\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k\pi}{a} \left[A_{0k} \operatorname{sh} \frac{k\pi y}{a} + B_{0k} \operatorname{ch} \frac{k\pi y}{a} - \frac{4C_0^{(0)} a^3 G^{(0)} y^{(0)}}{\pi E^{(0)}} \cdot \frac{(-1)^k}{k^3} \right] \times \\ &\times \cos \frac{k\pi x}{a} - \frac{1}{2} C_0^{(0)} (y^2 - h_1^2) + D, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \tau_{yz}^{(1)} &= -\frac{\partial \Psi_1}{\partial x} - \frac{1}{2} C_0^{(1)} (y^2 - h_1^2) = \\ &= -\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k\pi}{a} \left[A_{1k} \operatorname{sh} \frac{k\pi y}{a} + B_{1k} \operatorname{ch} \frac{k\pi y}{a} - \frac{4C_0^{(1)} a^3 G^{(1)} y^{(1)}}{\pi E^{(1)}} \cdot \frac{(-1)^k}{k^3} \right] \times \\ &\times \cos \frac{k\pi x}{a} - \frac{1}{2} C_0^{(1)} (y^2 - h_1^2), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
\tau_{yz}^{(1')} &= -\frac{\partial W_1'}{\partial x} - \frac{1}{2} C_0^{(1)} (y^2 - h_1^2) = \\
&= -\sum_{k=1}^{\infty} \frac{k\pi}{a} \left[A'_{1k} \operatorname{sh} \frac{k\pi y}{a} + B'_{1k} \operatorname{ch} \frac{k\pi y}{a} - \frac{4C_0^{(1)} a^3 G_{\vee}^{(1)(1)}}{\pi^3 E^{(1)}} \cdot \frac{(-1)^k}{k^3} \right] \times \\
&\times \cos \frac{k\pi x}{a} - \frac{1}{2} C_0^{(1)} (y^2 - h_1^2). \quad (16)
\end{aligned}$$

Перейдем к определению коэффициентов A_{0k} , B_{0k} , A_{1k} , B_{1k} , A'_{1k} , B'_{1k} и постоянных $C_0^{(0)}$, $C_0^{(1)}$, D .

Используя второе и третье из граничных условий, получаем уравнения

$$A_{1k} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_1}{a} + B_{1k} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_1}{a} - \frac{4C_0^{(1)} a^3 G_{\vee}^{(1)(1)}}{\pi^3 E^{(1)}} \cdot \frac{(-1)^k}{k^3} = 0, \quad (17)$$

$$-A'_{1k} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_1}{a} + B'_{1k} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_1}{a} - \frac{4C_0^{(1)} a^3 G_{\vee}^{(1)(1)}}{\pi^3 E^{(1)}} \cdot \frac{(-1)^k}{k^3} = 0. \quad (18)$$

На основании условий 4а и 5а, имеем:

$$\begin{aligned}
&A_{0k} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} + B_{0k} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} - \frac{4C_0^{(0)} a^3 G_{\vee}^{(0)(0)}}{\pi^3 E^{(0)}} \cdot \frac{(-1)^k}{k^3} = \\
&= A_{1k} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} + B_{1k} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} - \frac{4C_0^{(1)} a^3 G_{\vee}^{(1)(1)}}{\pi^3 E^{(1)}} \cdot \frac{(-1)^k}{k^3}, \quad (19)
\end{aligned}$$

$$-\frac{1}{2} C_0^{(0)} (h_0^2 - h_1^2) + D = -\frac{1}{2} C_0^{(1)} (h_0^2 - h_1^2), \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
&-A_{0k} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} + B_{0k} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} - \frac{4C_0^{(0)} a^3 G_{\vee}^{(0)(0)}}{\pi^3 E^{(0)}} \cdot \frac{(-1)^k}{k^3} = \\
&= -A'_{1k} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} + B'_{1k} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} - \frac{4C_0^{(1)} a^3 G_{\vee}^{(1)(1)}}{\pi^3 E^{(1)}} \cdot \frac{(-1)^k}{k^3}. \quad (21)
\end{aligned}$$

Из условия 6г вытекает, что

$$C_0^{(0)} J_0 + 2C_0^{(1)} J_1 = -P, \quad (22)$$

где

$$J_0 = \iint_{(s_0)} y^2 dx dy \quad \text{и} \quad J_1 = \iint_{(s_1)} y^2 dx dy = \iint_{(s_1')} y^2 dx dy$$

— моменты инерции поперечных сечений, соответственно, среднего

и наружного слоев относительно оси, параллельной оси x и проходящей через точку пересечения оси z с плоскостью соответствующего сечения.

Недостающие уравнения мы получим из условий 4б и 5б, но для этого нужно знать выражения для смещений в различных слоях консоли.

Уравнения, выражающие закон Гука в среднем слое составной консоли, можно привести к такому виду:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x^{(0)} &= -\frac{\nu^{(0)}}{E^{(0)}} C_0^{(0)} yz, \\ \varepsilon_y^{(0)} &= -\frac{\nu^{(0)}}{E^{(0)}} C_0^{(0)} yz, \\ \varepsilon_z^{(0)} &= \frac{1}{E^{(0)}} C_0^{(0)} yz, \\ \gamma_{yz}^{(0)} &= -\frac{1}{G^{(0)}} \left[\frac{\partial \Psi_0}{\partial x} + \frac{1}{2} C_0^{(0)} (y^2 - h_1^2) + D \right], \\ \gamma_{xz}^{(0)} &= \frac{1}{G^{(0)}} \frac{\partial \Psi_0}{\partial y}, \\ \gamma_{xy}^{(0)} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

Учитывая, что

$$\varepsilon_x^{(0)} = \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad \varepsilon_y^{(0)} = \frac{\partial v_0}{\partial y}, \quad \varepsilon_z^{(0)} = \frac{\partial w_0}{\partial z},$$

$$\gamma_{yz}^{(0)} = \frac{\partial w_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial z}, \quad \gamma_{xz}^{(0)} = \frac{\partial w_0}{\partial x} + \frac{\partial u_0}{\partial z}, \quad \gamma_{xy}^{(0)} = \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial u_0}{\partial y}$$

и интегрируя (23), придем к следующим выражениям для смещений u_0 , v_0 , w_0 в среднем слое:

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= -\frac{\nu^{(0)}}{E^{(0)}} C_0^{(0)} xyz + C_2^{(0)} y + C_1^{(0)} z + C_3^{(0)}, \\ v_0 &= \frac{\nu^{(0)}}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} z(x^2 - y^2) - \frac{1}{6E^{(0)}} C_0^{(0)} z^3 - C_2^{(0)} x + C_4^{(0)} z + C_5^{(0)}, \\ w_0 &= \frac{1}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} yz^2 - \frac{\nu^{(0)}}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} x^2 y + \frac{\nu^{(0)}}{6E^{(0)}} C_0^{(0)} y^3 - \frac{1}{G^{(0)}} \int \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} dy - \\ &\quad - \frac{1}{2G^{(0)}} C_0^{(0)} y \left(\frac{1}{3} y^2 - h_1^2 \right) - \frac{1}{G^{(0)}} Dy - C_1^{(0)} x - C_4^{(0)} y + C_6^{(0)}. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

В (24) $C_1^{(0)}$, $C_2^{(0)}$, $C_3^{(0)}$, $C_4^{(0)}$, $C_5^{(0)}$ и $C_6^{(0)}$ — произвольные постоянные интегрирования, которые определяют «жесткое» смещение без деформации и которые мы найдем с помощью седьмого из граничных условий:

$$\begin{aligned} C_1^{(0)} &= 0, \quad C_2^{(0)} = 0, \quad C_3^{(0)} = 0, \\ C_4^{(0)} &= \frac{1}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} l^2, \quad C_5^{(0)} = -\frac{1}{3E^{(0)}} C_0^{(0)} l^3, \\ C_6^{(0)} &= \frac{1}{G^{(0)}} \left(\int \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} dy \right)_{x=y=0}. \end{aligned}$$

Таким образом, формулы для смещений u_0 , v_0 , w_0 в среднем слое Ω_0 приводятся к виду:

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= -\frac{\nu^{(0)}}{E^{(0)}} C_0^{(0)} xyz, \\ v_0 &= \frac{\nu^{(0)}}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} z(x^2 - y^2) - \frac{1}{6E^{(0)}} C_0^{(0)} (z^3 + 2l^3) + \frac{1}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} l^2 z, \\ w_0 &= \frac{1}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} y(z^2 - l^2) - \frac{1}{2G^{(0)}} C_0^{(0)} y \left(\frac{1}{3} y^2 - h_1^2 \right) - \\ &\quad - \frac{\nu^{(0)}}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} x^2 y + \frac{\nu^{(0)}}{6E^{(0)}} C_0^{(0)} y^3 - \frac{1}{G^{(0)}} \int \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} dy - \\ &\quad - \frac{1}{G^{(0)}} Dy + \frac{1}{G^{(0)}} \left(\int \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} dy \right)_{x=y=0}. \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Интегрируя уравнения

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial x} &= -\frac{\nu^{(1)}}{E^{(1)}} C_0^{(1)} yz, \\ \frac{\partial v_1}{\partial y} &= -\frac{\nu^{(1)}}{E^{(1)}} C_0^{(1)} yz, \\ \frac{\partial w_1}{\partial z} &= \frac{1}{E^{(1)}} C_0^{(1)} yz, \\ \frac{\partial w_1}{\partial y} + \frac{\partial v_1}{\partial z} &= -\frac{1}{G^{(1)}} \left[\frac{\partial \Psi_1}{\partial x} + \frac{1}{2} C_0^{(1)} (y^2 - h_1^2) \right], \\ \frac{\partial w_1}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial z} &= \frac{1}{G^{(1)}} \frac{\partial \Psi_1}{\partial y}, \\ \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

получим следующие выражения для смещений u_1, v_1, w_1 в слое Ω_1 :

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= -\frac{\nu^{(0)}}{E^{(0)}} C_0^{(1)} x y z + C_2^{(1)} y + C_1^{(1)} z + C_3^{(1)}, \\ v_1 &= \frac{\nu^{(0)}}{2E^{(0)}} C_0^{(1)} z (x^2 - y^2) - \frac{1}{6E^{(0)}} C_0^{(1)} z^3 + C_2^{(1)} x + C_4^{(1)} z + C_5^{(1)}, \\ w_1 &= \frac{1}{2E^{(0)}} C_0^{(1)} y z^2 - \frac{\nu^{(0)}}{2E^{(0)}} C_0^{(1)} x^2 y + \frac{\nu^{(0)}}{6E^{(0)}} C_0^{(1)} y^3 - \\ &\quad - \frac{1}{2G^{(0)}} C_0^{(1)} y \left(\frac{1}{3} y^2 - h_1^2 \right) - \frac{1}{G^{(0)}} \int \frac{\partial \Psi_1}{\partial x} dy, \\ &\quad C_1^{(1)} x + C_4^{(1)} y + C_6^{(1)}, \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

где $C_1^{(1)}, C_2^{(1)}, C_3^{(1)}, C_4^{(1)}, C_5^{(1)}, C_6^{(1)}$ — произвольные постоянные, которые найдутся из условий непрерывности смещений на границе слоев Ω_1 и Ω_0 .

Таким же образом, интегрируя уравнения

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u'_1}{\partial x} &= -\frac{\nu^{(0)}}{E^{(0)}} C_0^{(1)} y z, \\ \frac{\partial v'_1}{\partial y} &= \frac{\nu^{(0)}}{E^{(0)}} C_0^{(1)} y z, \\ \frac{\partial w'_1}{\partial z} &= \frac{1}{E^{(0)}} C_0^{(1)} y z, \\ \frac{\partial w'_1}{\partial y} + \frac{\partial v'_1}{\partial z} &= -\frac{1}{G^{(0)}} \left[\frac{\partial \Psi'_1}{\partial x} + \frac{1}{2} C_0^{(1)} (y^2 - h_1^2) \right], \\ \frac{\partial w'_1}{\partial x} + \frac{\partial u'_1}{\partial z} &= \frac{1}{G^{(0)}} \frac{\partial \Psi'_1}{\partial y}, \\ \frac{\partial v'_1}{\partial x} + \frac{\partial u'_1}{\partial y} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

получим:

$$\begin{aligned}
 u_1' &= -\frac{\nu^{(1)}}{E^{(1)}} C_0^{(1)} x y z + C_2^{(1')} y + C_1^{(1')} z + C_3^{(1')}, \\
 v_1' &= \frac{\nu^{(1)}}{2E^{(1)}} C_0^{(1)} z (x^2 - y^2) - \frac{1}{6E^{(1)}} C_0^{(1)} z^3 - C_2^{(1')} x + \\
 &\quad + C_4^{(1')} z + C_5^{(1')}, \\
 w_1' &= \frac{1}{2E^{(1)}} C_0^{(1)} y z^2 - \frac{\nu^{(1)}}{2E^{(1)}} C_0^{(1)} x^2 y + \frac{\nu^{(1)}}{6E^{(1)}} C_0^{(1)} y^3 - \\
 &\quad - \frac{1}{2G^{(1)}} C_0^{(1)} y \left(\frac{1}{3} y^2 - h_1^2 \right) - \frac{1}{G^{(1)}} \int \frac{\partial \Psi_1'}{\partial x} dy - \\
 &\quad - C_1^{(1')} x - C_4^{(1')} y + C_6^{(1')}.
 \end{aligned} \tag{29}$$

Произвольные постоянные $C_1^{(1')}$, $C_2^{(1')}$, $C_3^{(1')}$, $C_4^{(1')}$, $C_5^{(1')}$, $C_6^{(1')}$, а также произвольные постоянные интегрирования в (27) определяются соответственно из граничных условий 5б и 4б, на основании которых имеем:

$$\begin{aligned}
 C_1^{(1')} &= C_1^{(1)} = C_1^{(0)} = 0, \\
 C_2^{(1')} &= C_2^{(1)} = C_2^{(0)} = 0, \\
 C_3^{(1')} &= C_3^{(1)} = C_3^{(0)} = 0, \\
 C_4^{(1')} &= C_4^{(1)} = C_4^{(0)} = \frac{1}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} l^2, \\
 C_5^{(1')} &= C_5^{(1)} = C_5^{(0)} = -\frac{1}{3E^{(0)}} C_0^{(0)} l^3, \\
 C_6^{(1')} &= \frac{1}{2} h_0 \left(-\frac{1}{3} h_0^2 - h_1^2 \right) \left(\frac{C_0^{(1)}}{G^{(1)}} - \frac{C_0^{(0)}}{G^{(0)}} \right) - \frac{1}{G^{(0)}} D h_0 + \\
 &\quad + \frac{1}{G^{(0)}} \left(\int \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} dy \right)_{x=y=0}, \\
 C_6^{(1')} &= \frac{1}{2} h_0 \left(\frac{1}{3} h_0^2 - h_1^2 \right) \left(\frac{C_0^{(0)}}{G^{(0)}} - \frac{C_0^{(1)}}{G^{(1)}} \right) + \\
 &\quad + \frac{1}{G^{(0)}} D h_0 + \frac{1}{G^{(0)}} \left(\int \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} dy \right)_{x=y=0},
 \end{aligned} \tag{30}$$

$$\frac{\nu^{(1)}}{E^{(1)}} C_0^{(1)} = \frac{\nu^{(0)}}{E^{(0)}} C_0^{(0)}, \quad (31)$$

$$\frac{C_0^{(1)}}{E^{(1)}} = \frac{C_0^{(0)}}{E^{(0)}}, \quad (32)$$

$$\frac{1}{G^{(1)}} \left(\int \frac{\partial \Psi_1}{\partial x} dy \right)_{y=h_0} = \frac{1}{G^{(0)}} \left(\int \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} dy \right)_{y=h_0}, \quad (33)$$

$$\frac{1}{G^{(1)}} \left(\int \frac{\partial \Psi_1'}{\partial x} dy \right)_{y=h_0} = \frac{1}{G^{(0)}} \left(\int \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} dy \right)_{y=h_0}. \quad (34)$$

Тогда смещения в слоях Ω_1 и Ω_1' приводятся к такому виду:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{\nu^{(1)}}{E^{(1)}} C_0^{(1)} x y z, \\ v_1 &= \frac{\nu^{(1)}}{2E^{(1)}} C_0^{(1)} z(x^2 - y^2) - \frac{1}{6E^{(1)}} C_0^{(1)} z^3 + \frac{1}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} l^2 z - \\ &\quad - \frac{1}{3E^{(0)}} C_0^{(0)} l^3, \\ w_1 &= \frac{1}{2E^{(1)}} C_0^{(1)} y z^2 - \frac{\nu^{(1)}}{2E^{(1)}} C_0^{(1)} x^2 y + \frac{\nu^{(1)}}{6E^{(1)}} C_0^{(1)} y^3 - \\ &\quad - \frac{1}{2G^{(1)}} C_0^{(1)} y \left(\frac{1}{3} y^2 - h_1^2 \right) - \frac{1}{G^{(1)}} \int \frac{\partial \Psi_1}{\partial x} dy - \\ &\quad - \frac{1}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} l^2 y + \frac{1}{2} h_0 \left(\frac{1}{3} h_0^2 - h_1^2 \right) \left(\frac{C_0^{(1)}}{G^{(1)}} - \frac{C_0^{(0)}}{G^{(0)}} \right) - \\ &\quad - \frac{1}{G^{(0)}} D h_0 + \frac{1}{G^{(0)}} \left(\int \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} dy \right)_{x=y=0}. \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1' &= \frac{\nu^{(1)}}{E^{(1)}} C_0^{(1)} x y z, \\ v_1' &= \frac{\nu^{(1)}}{2E^{(1)}} C_0^{(1)} z(x^2 - y^2) - \frac{1}{6E^{(1)}} C_0^{(1)} z^3 + \\ &\quad + \frac{1}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} l^2 z - \frac{1}{3E^{(0)}} C_0^{(0)} l^3. \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

$$\begin{aligned}
w_1' - \frac{1}{2E^{(1)}} C_0^{(1)} y z^2 - \frac{\nu^{(1)}}{2E^{(1)}} C_0^{(1)} x^2 y + \frac{\nu^{(1)}}{6E^{(1)}} C_0^{(1)} y^3 - \\
- \frac{1}{2G^{(1)}} C_0^{(1)} y \left(\frac{1}{3} y^2 - h_1^2 \right) - \frac{1}{G^{(1)}} \int \frac{\partial \Psi_1'}{\partial x} dy - \\
- \frac{1}{2E^{(0)}} C_0^{(0)} l^2 y + \frac{1}{2} h_0 \left(\frac{1}{3} h_0^2 - h_1^2 \right) \left(\frac{C_0^{(0)}}{G^{(0)}} - \frac{C_0^{(1)}}{G^{(1)}} \right) + \\
+ \frac{1}{G^{(0)}} D h_0 + \frac{1}{G^{(0)}} \left(\int \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} dy \right)_{x=y=0} = 0.
\end{aligned} \quad (36)$$

Из (31) и (32) вытекает условие, которое налагает ограничение на коэффициенты Пуассона, характеризующие поперечные сжатия слоев в плоскостях изотропии при растяжении в направлениях, перпендикулярных к этим плоскостям, а именно:

$$\nu^{(1)} = \nu^{(0)}. \quad (37)$$

Таким образом, решение данной задачи об изгибе составной консоли в форме, аналогичной решению соответствующей задачи для цельной консоли, возможно лишь в том случае, если имеет место равенство (37). Чтобы избежать этого ограничения, хотя и не очень сильного, нужно исходить из более общих предположений, по сравнению с нашими.

Решая систему, состоящую из (22) и (32), найдем $C_0^{(0)}$ и $C_0^{(1)}$:

$$C_0^{(0)} = - \frac{PE^{(0)}}{J_0 E^{(0)} + 2J_1 E^{(1)}}, \quad (38)$$

$$C_0^{(1)} = - \frac{PE^{(1)}}{J_0 E^{(0)} + 2J_1 E^{(1)}}. \quad (39)$$

После этого с помощью (20), (38) и (39) определяем постоянную D :

$$D = \frac{P(h_1^2 - h_0^2)(E^{(0)} - E^{(1)})}{2(J_0 E^{(0)} + 2J_1 E^{(1)})}. \quad (40)$$

Для нахождения неизвестных коэффициентов $A_{0\kappa}$, $B_{0\kappa}$, $A_{1\kappa}$, $B_{1\kappa}$, $A'_{1\kappa}$, $B'_{1\kappa}$ мы имели уже (17), (18), (19) и (21). Добавляя к ним еще (33) и (34), получим следующую систему:

$$\begin{aligned}
 & A_{1\kappa} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_1}{a} + B_{1\kappa} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_1}{a} - \frac{4C_0^{(1)} a^3 G^{(1)} \sqrt{}}{\pi^3 E^{(1)}} \cdot \frac{(-1)^\kappa}{k^3} = 0, \\
 & A'_{1\kappa} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_1}{a} + B'_{1\kappa} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_1}{a} - \frac{4C_0^{(1)} a^3 G^{(1)} \sqrt{}}{\pi^3 E^{(1)}} \cdot \frac{(-1)^\kappa}{k^3} = 0, \\
 & A_{0\kappa} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} + B_{0\kappa} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} - \frac{4C_0^{(0)} a^3 G^{(0)} \sqrt{}}{\pi^3 E^{(0)}} \cdot \frac{(-1)^\kappa}{k^3} = \\
 & - A_{1\kappa} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} + B_{1\kappa} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} - \frac{4C_0^{(1)} a^3 G^{(1)} \sqrt{}}{\pi^3 E^{(1)}} \cdot \frac{(-1)^\kappa}{k^3}, \\
 & - A_{0\kappa} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} + B_{0\kappa} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} - \frac{4C_0^{(0)} a^3 G^{(0)} \sqrt{}}{\pi^3 E^{(0)}} \cdot \frac{(-1)^\kappa}{k^3} = \\
 & - A'_{1\kappa} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} + B'_{1\kappa} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} - \frac{4C_0^{(1)} a^3 G^{(1)} \sqrt{}}{\pi^3 E^{(1)}} \cdot \frac{(-1)^\kappa}{k^3}, \\
 & \frac{1}{G^{(1)}} \left(A_{1\kappa} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} + B_{1\kappa} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} \right) = \frac{1}{G^{(0)}} \times \\
 & \times \left(A_{0\kappa} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} + B_{0\kappa} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} \right), \\
 & \frac{1}{G^{(1)}} \left(A'_{1\kappa} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} - B'_{1\kappa} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} \right) = -\frac{1}{G^{(0)}} \times \\
 & \times \left(A_{0\kappa} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} - B_{0\kappa} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} \right).
 \end{aligned} \tag{41}$$

Из этой системы вытекает, что

$$A_{0\kappa} = 0, \tag{42}$$

$$B_{0\kappa} = -\frac{4(-1)^\kappa C_0^{(0)} a^3 G^{(0)} \sqrt{}}{\pi^3 E^{(0)} M \operatorname{ch} \frac{k\pi h_1}{a}} \left[M - N \operatorname{ch} \frac{k\pi}{a} (h_1 - h_0) \right], \tag{43}$$

$$A'_{1\kappa} = -A_{1\kappa} = \frac{4(-1)^\kappa C_0^{(0)} a^3 G^{(1)} \sqrt{}}{\pi^3 E^{(0)} M} N \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a}, \tag{44}$$

$$B'_{1\kappa} = B_{1\kappa} = \frac{4(-1)^\kappa C_0^{(0)} a^3 \sqrt{G^{(1)}}}{\pi k^2 E^{(0)} M \operatorname{ch} \frac{k\pi h_1}{a}} \left(M + N \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_1}{a} \right), \quad (45)$$

$$\text{где } M = G^{(1)} \operatorname{sh} \frac{k\pi h_0}{a} \operatorname{sh} \frac{k\pi}{a} (h_1 - h_0) + G^{(0)} \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} \operatorname{ch} \frac{k\pi}{a} (h_1 - h_0),$$

$$N = (G^{(1)} - G^{(0)}) \left(\operatorname{ch} \frac{k\pi h_1}{a} - \operatorname{ch} \frac{k\pi h_0}{a} \right).$$

Поскольку $A_{0\kappa} = 0$,

$$\left(\int \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} dy \right)_{x=y=0} = 0.$$

В таком случае,

$$C_6^{(0)} = 0,$$

$$C_6^{(1)} = -C_6^{(1')} = \frac{1}{2} h_0 \left(\frac{1}{3} h_0^2 - h_1^2 \right) \left(\frac{C_0^{(1)}}{G^{(1)}} - \frac{C_0^{(0)}}{G^{(0)}} \right) - \frac{1}{G^{(0)}} D h_0.$$

Пользуясь (25), (35) и (36), отбросим последние слагаемые в выражениях для w_0 , w_1 , w'_1 , т. е. слагаемое.

$$\frac{1}{G^{(0)}} \left(\int \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} dy \right)_{x=y=0},$$

равное нулю.

Таким образом, все неизвестные постоянные найдены и получены разложения неизвестных функций Ψ_0 , Ψ_1 и Ψ'_1 в виде рядов Фурье.

Легко видеть, что граничное условие бд удовлетворяется тождественно, независимо от значений напряжений $\sigma_z^{(0)}$, $\sigma_z^{(1)}$, $\sigma_z^{(1')}$. Удовлетворяются и оставшиеся условия ба, бб и бе.

Из выражения для v_0 в (25) можно получить уравнение изогнутой оси, которая оказывается плоской кривой

$$y' = \frac{P}{6(J_0 E^{(0)} + 2J_1 E^{(1)})} (z^3 - 3l^2 z + 2l^3), \quad (46)$$

где $y' = v_0 \big|_{x=y=0}$.

Наибольший прогиб (на незакрепленном конце) определяется по формуле

$$f_y = \frac{Pl^3}{3(J_0 E^{(0)} + 2J_1 E^{(1)})}. \quad (47)$$

В заключение обратим внимание на то, что решение соответствующей задачи об изгибе консоли, составленной из трех слоев изотропных материалов, может быть представлено в таком же виде, как и решение рассмотренной выше задачи. Однако при этом нужно заметить, что для изотропных слоев имеют место следующие соотношения:

$$G^{(0)} = \frac{E^{(0)}}{2(1 + \nu^{(0)})},$$

$$G^{(1)} = \frac{E^{(1)}}{2(1 + \nu^{(1)})}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Лехницкий, Теория упругости анизотропного тела, М.-Л., 1950.

Поступила 8/V 1957 г.

Канд. техн. наук И. А. НАЗАРОВ

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О КРУЧЕНИИ ОДНОГО СТЕРЖНЯ НЕКРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

При расчете метчиков на прочность требуется определить наибольшее касательное напряжение, возникающее при кручении стержня, поперечное сечение которого представляет собою круг с четырьмя симметричными лунками (рис. 1). При $r/R = 1/3$ такая задача была решена численным способом Б. Розовской [1]. В настоящей заметке приводятся результаты решения той же задачи для $r/R = 1/2$.

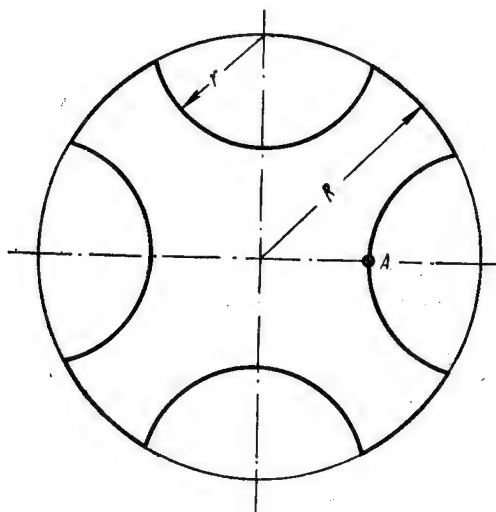


Рис. 1. Сечение стержня

Как известно [2], определение касательных напряжений, возникающих при чистом кручении стержня, сводится к решению уравнения Лапласа $\Delta \Psi(x, y) = 0$ для поперечного сечения этого стержня при граничных условиях $\Psi_{ep} = \frac{x^2 + y^2}{2}$.

Задача решена методом сеток (форма сетки показана на рис. 2). Ввиду симметрии сечения, решение проводилось для $1/8$

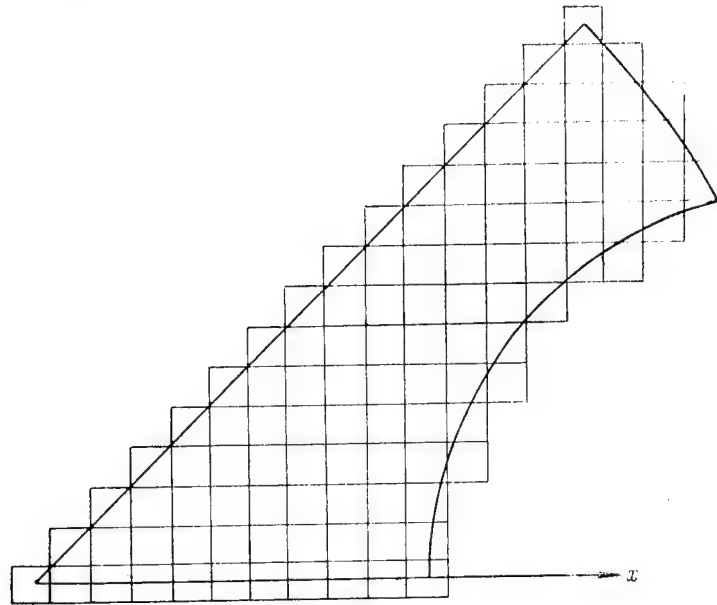


Рис. 2. Форма сетки

его части. Первое приближение было получено на сеточном электроинтеграторе, а затем уточнено методом итерации. Окончательные значения функции $\Psi(x, y)$ приведены на рис. 3.

Касательное напряжение в точке А (см. рис. 1) находится по формуле [2]

$$\tau_A = \frac{\frac{\partial F}{\partial x} \Big|_A \cdot M}{CK^3}; \quad F(x, y) = \Psi(x, y) - \frac{x^2 + y^2}{2};$$

$$C = 2 \iint_{(s)} F(x, y) ds,$$

где M — крутящий момент;
 R — радиус внешней окружности.

Производная была вычислена по интерполяционной формуле с учетом третьей разности. Окончательный результат

$$\tau_A \cong 3,8 \frac{M}{R^3}.$$

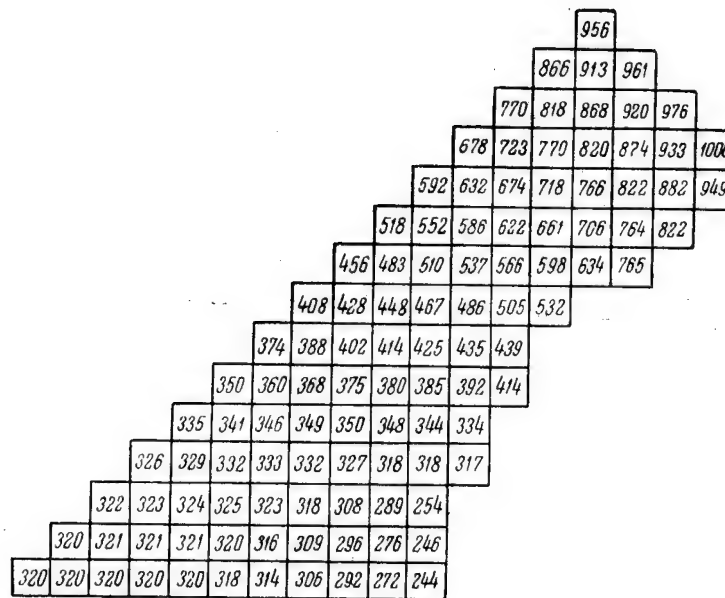


Рис. 3. Окончательные значения функции $\Psi(x, y)$
 (даны значения $\frac{\Psi(x, y) \cdot 1000}{0,5125 R}$)

Интересно отметить, что очень близкий результат получился при контрольном расчете, сделанном по приближенному методу. Этот метод [3] состоит в том, что исследуемое сечение разбивается на части, жесткости которых могут быть легко вычислены. Принимается, что крутящий момент распределяется между составляющими частями сечения пропорционально их жесткостям. Разбиение сечения на части показано на рис. 4. Все расчетные коэффициенты были взяты из [3]. В результате получено

$$\tau_A \cong 4,0 \frac{M}{R^3}.$$

(Сравнить с результатом, полученным по методу сеток).

Для сечения с $r/R = 1/3$ Б. Розовской получено [1]

$$\tau_A \cong 1,77 \frac{M}{R^3}.$$

Проделанный автором расчет (методом разбиения сечения) дал

$$\tau_A \cong 2,0 \frac{M}{R^3}.$$

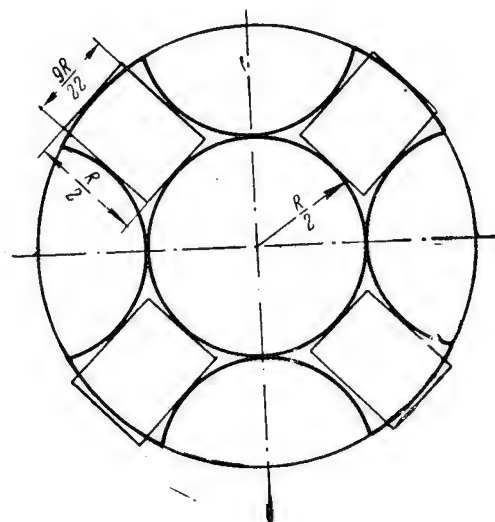


Рис. 4. Разбиение сечения при расчете по приближенному методу

Из сравнения результатов, полученных двумя различными методами, можно сделать вывод, что приближенный метод расчета напряжений, изложенный в [3], практически не уступает по точности методу сеток, являясь значительно более простым.

Автор благодарит канд. техн. наук, доц. Г. Н. Титова за постановку задачи и студентов В. Битюцкого и Л. Душаева за помощь в вычислениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Вестник инженеров и техников» № 6, 1937.
2. Н. И. Безухов, Теория упругости и пластичности, 1954.
3. Н. М. Беляев, Курс сопротивления материалов, 1951.

Поступила 24/X 1956 г.

Канд. техн. наук, доц. Ю. Д. ПЕРВИЦКИЙ

О КЛАССИФИКАЦИИ И ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ХОЛОДНОЙ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ

1. Перспективность холодной сварки давлением

Процесс, получивший название холодной сварки давлением, применяют для скрепления без нагрева как однородных, так и разнородных металлов и сплавов. Наиболее исследована холодная сварка алюминия, алюминия с медью и сплавов АМг, АМц и Д1. Экспериментально доказана возможность сварки кадмия, никеля, серебра с медью, алюминия с железом Армко и некоторых других металлов [1, 3, 5, 9].

Для некоторых металлов и сплавов соединения, выполненные холодной сваркой, по прочности, электропроводности и антикоррозийной стойкости не уступают соединениям, выполненным другими способами [4, 5, 8, 9].

Область применения холодной сварки давлением весьма разнообразна, так как она может осуществляться разными способами с использованием инструмента различной формы. Для этого вида сварки требуется несложное оборудование и значительно меньшая затрата энергии, времени и средств, чем для других способов сварки. Простота выполнения процесса сварки обеспечивает возможность автоматизации его.

Результаты исследований и положительный опыт внедрения холодной сварки давлением в производство показывают широкие возможности эффективного использования ее.

Однако разрозненная, недостаточно направленная, исследовательская работа отстает от запросов производства. В связи с этим возникла необходимость обобщить имеющиеся данные, разработать классификацию холодной сварки давлением и наметить очередные задачи целеустремленного исследования прогрессивного процесса.

2. Основные технологические характеристики разных способов холодной сварки давлением

Для осуществления прочной сварки давлением при комнатной температуре необходимо, чтобы вдавливание пуансонов или непосредственное давление свариваемых элементов друг на друга вызвало большую пластическую деформацию (течение) металла у предварительно обезжиренной и очищенной поверхности контакта соединяемых элементов. При этом пленки окислов и других адсорбированных веществ разрываются и незагрязненные примесями внутренние кристаллиты выходят на поверхность соприкосновения свариваемых элементов. Образуется чистый металлический контакт. Под действием больших удельных давлений и сухого трения активные поверхностные слои атомов соседних кристаллитов сближаются и срастаются. Прочный металлический контакт образуется за счет сил межатомного взаимодействия и сохраняется после снятия внешнего давления [7].

Прочность сварного соединения зависит от свойств материала и толщины свариваемых элементов, способа подготовки поверхности контакта, формы и размеров инструмента и степени деформации металла в зоне сварки.

По характеру выполнения и форме соединения свариваемых элементов холодную сварку давлением можно подразделить на точечную, контурную, шовную и стыковую.

Точечную и шовную сварку применяют обычно для соединения элементов из листового и полосового материала, а стыковую — для соединения проводов и стержней.

Подготовка поверхности контакта свариваемых элементов заключается в обязательном удалении жировых пленок и других загрязнений. Наиболее надежно это осуществляют кривокопкой круглой щеткой $\varnothing 150-200$ мм из стальной проволоки $\varnothing 0,2-0,3$ мм при скорости вращения 1500—1200 об/мин. Для элементов сложной конфигурации из алюминия И. Б. Баранов рекомендует применять обжиг в муфельной печи при температуре до 450°C с выдержкой в течение 30—60 минут [5]. При этом жировые пленки и другие загрязнения сгорают. Хрупкая окисная пленка разрушается деформацией при сварке давлением.

Точечную сварку осуществляют путем двухстороннего или одностороннего вдавливания в свариваемые элементы цилиндрических, прямоугольных или фасонных пуансонов.

На рис. 1а показана схема наиболее простого способа сварки давлением без предварительного прижатия свариваемых элементов. В этом случае высота деформирующих выступов пуансонов h должна точно соответствовать толщине свариваемых элемен-

тов s . Пуансоны снабжены заплеками $D \geq 4d$ для выравнивания металла вокруг сварной точки в конечный момент сварки.

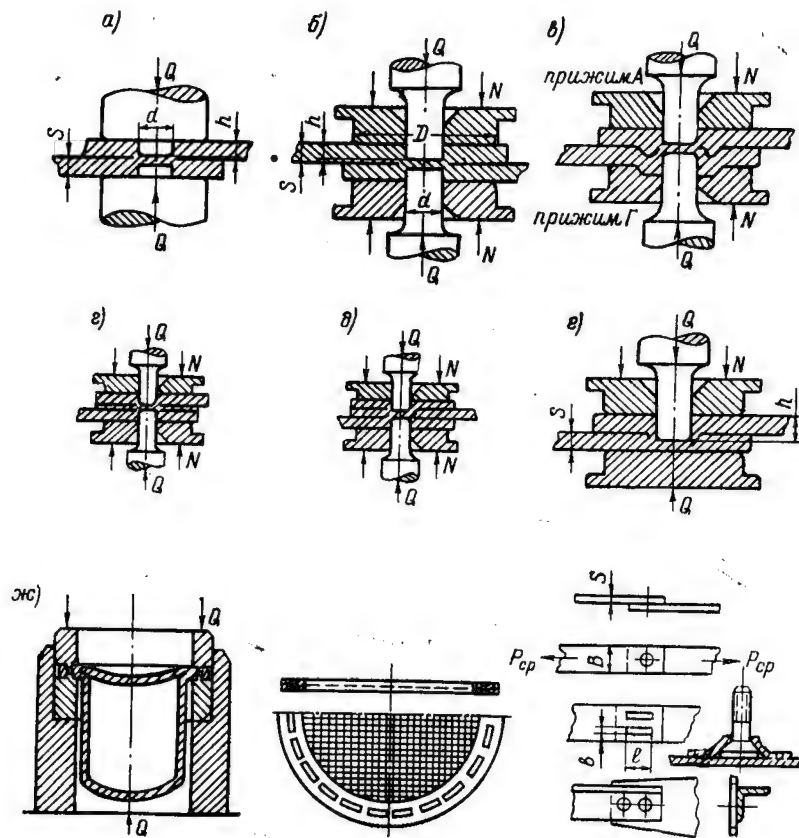


Рис. 1. Схемы различных способов точечной и контурной сварки давлением и примеры соединений

На рис. 1б показана схема способа сварки с предварительным прижатием силой N свариваемых элементов друг к другу до вдавливания в них пуансонов силой Q . Предварительное прижатие способствует увеличению прочности сварных соединений [5, 9].

Применение одного из прижимов с выточкой вокруг пуансона, как показано на рис. 1в, способствует еще большему повышению прочности за счет направленного течения металла в зоне сварки и образования кольцевого замка, воспринимающего часть срезающего усилия [9].

Одностороннее вдавливание пуансонов применяют в случаях, когда поверхность одного из соединяемых элементов должна остаться гладкой, без углублений (рис. 1е). В этом случае прочность сварной точки на срез при сварке алюминия, меди и сплавов АМг, АМц и ДІ (отожженных) снижается на 20—40 %, а при сварке сплавов менее пластичных ДЗП и ДІ6, по опытам Н. А. Догадкина, повышается на 13—45 %.

При непосредственном контакте свариваемых элементов хорошо свариваются давлением пластичные материалы: алюминий, медь, сплавы АМг, АМц и ДІ в отожженном состоянии. Для сварки элементов из более твердых материалов целесообразно применять прокладку из алюминия толщиной от 0,8 до 1 мм (рис. 1г). По опытам Н. А. Догадкина применение прокладки толщиной 1 мм может повысить прочность сварки листов $s = 2$ мм из сплавов ДЗП и ДІ6 (закаленных и состаренных) на 260 %. Этот способ можно назвать холодной пайкой давлением.

Для сварки элементов разной твердости, например железа Армко с алюминием или медью, применяют накладку из более мягкого материала, при этом более твердый элемент располагают между накладкой и мягким элементом (рис. 1д) [1].

При сварке листов разной толщины, или из материалов разной пластичности, применяют пуансоны разного размера или одностороннее вдавливание. Размеры деформирующих выступов пуансонов обратно пропорциональны твердости свариваемых материалов, уточняются опытным путем.

Контурную сварку осуществляют путем одностороннего или двухстороннего вдавливания пуансонов, имеющих форму заданного контура соединения: кольцевую, прямоугольную или фигурную. В зависимости от формы деформирующих выступов можно выполнять сплошные прочно-плотные или пунктирные соединения (рис. 1ж).

Оптимальные размеры деформирующих выступов пуансонов зависят от свойств материала и толщины свариваемых элементов. При сварке листов из алюминия, меди и сплавов АМг, АМц и ДІ (отожженных) толщиной $s = 1—5$ мм применяют цилиндрические пуансоны $d \approx (2—3)s$. Кромку пуансона у торца закругляют $r = 0,1d$. У прямоугольных пуансонов $b \approx (1—1,5)s$, $l \approx (4—6)s$. Размер прижимов $D \approx 5d$. Удельное давление на прижимы $q = 3—5$ кг/мм².

Глубина вдавливания пуансонов оказывает решающее влияние на прочность сварных соединений. Чем больше h , тем больше площадь и прочность зоны сварки. При двухстороннем вдавливании пуансонов рекомендуется $h \approx (0,85—0,90)s$, при одностороннем — $h \approx (1,4—1,6)s$, если толщина свариваемых элементов одинаковая.

Скорость деформации не оказывает влияния на прочность соединений.

Надежность холодной сварки давлением характеризуется устойчивостью результатов испытания на прочность образцов, сваренных в разное время, но при одинаковых режимах. На рис. 2 приведены кривые распределения, построенные по результатам испытания точечных соединений образцов из алюминия А2 и сплава АМгА-М толщиной $s = 2$ мм. Наибольшие отклонения от средних значений разрушающего усилия на срез $P_{ср}$ не превышали $\pm 10-15\%$ [9].

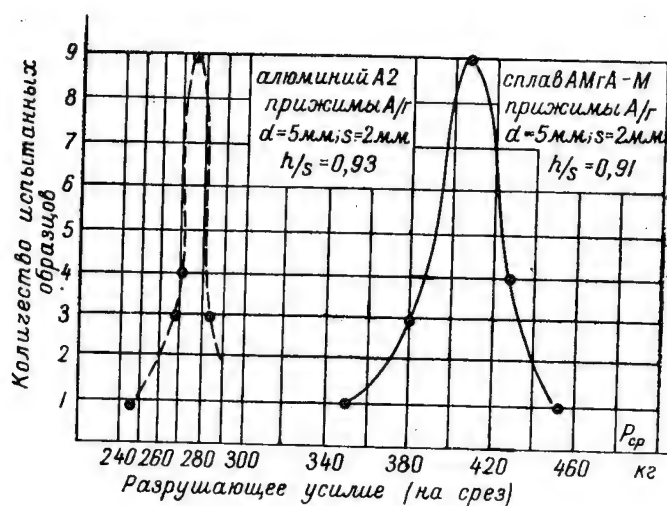


Рис. 2. Кривые распределения, характеризующие надежность и прочность точечных соединений, выполненных холодной сваркой давлением

В табл. 1, в качестве примера, приведены некоторые данные о прочности на срез точечных соединений, выполненных цилиндрическими пуансонами при симметричных А/А и несимметричных А/Г прижимах [7]. Конструкторам следует учитывать, что прочность соединения на отрыв с изгибом, как и для соединений контактной электросваркой, в 2—4 раза меньше, чем на срез.

Шовную сварку осуществляют прокаткой соединяемых элементов между роликами. Применяют двухстороннее (рис. 3а и 3в) и одностороннее (рис. 3б и 3г) вдавливание выступов роликов. Для выполнения прочно-плотных швов применяют ролики со сплошным выступом, а для выполнения пунктирных швов — ролики с выступами в виде зубьев (рис. 3г).

Таблица 1

Данные о прочности односточечных и многоточечных соединений

Характер соединения	Схема точечной сварки	Прижимы	Материал	$s = 2 \text{ мм}$			$s = 1,5 \text{ мм}$			$s = 1 \text{ мм}$		
				d	h/s	$P_{ср}$	d	h/s	$P_{ср}$	d	h/s	$P_{ср}$
Односточечный	по рис. 1 б	А/А	А2	6	0,88	240	—	—	—	—	—	—
			АМцА-М	7,2	0,87	300	5	0,91	170	5	0,87	112
			АМгА-М	7,2	0,84	340	—	—	—	5	0,85	120
			Д1А-М	—	—	—	5	0,87	168	—	—	—
Односточечный	по рис. 1 в	А/Г	А2	6	0,88	300	—	—	—	—	—	—
			АМцА-М	7,2	0,87	380	5	0,92	246	5	0,88	140
			АМгА-М	7,2	0,85	475	—	—	—	5	0,85	180
			Д1А-М	5	0,85	320	5	0,87	240	5	0,77	115
Двухточечный в ряд	по рис. 1 в	А/Г	АМгА-М	5	0,85	645	—	—	—	—	—	—
Трехточечный, по вершинам треугольника				5	0,85	930	—	—	—	—	—	—
Четырехточечный по углам квадрата				5	0,85	1355	—	—	—	—	—	—

Ширина образцов $B = 30 \text{ мм}$, длина $H = 140 \text{ мм}$.

Во избежание удлинения и искривления шва размеры роликов должны соответствовать толщине свариваемых элементов: $D_p \geq 50s$, $b \approx (1-1,2)s$, $h \approx (0,80-0,90)s$ при двухстороннем или $h \approx (1,4-1,6)s$ при одностороннем вдавливании [10].

Для увеличения прочности соединения применяют узкие фланцы или еще лучше соединение внахлестку (рис. 3б).

Стыковая сварка наиболее рациональная и наиболее прочная (рис. 4). Зачистку торцов производят крацовкой или путем среза тонкого слоя металла ножом или специальными ножницами. В зависимости от взаимного расположения соединяемых элементов выполняют соединения в стык (рис. 4а), впритык или втавр (рис. 4б) и в наладку (рис. 4в). Сварка в стык алюминия, меди и алюминия с медью обеспечивает наибольшую прочность и надежность соединения не только на разрыв, а и на изгиб при ударной нагрузке, при условии, если высота деформируемых выступов $h \geq s$ [8]. Сварка в наладку менее прочная и требует

бóльшей затраты материала. Ее применяют для соединения алюминиевых и медных проводов $s = 1—5$ мм, при этом размер $e \approx 0,8s$ для алюминиевых и $e \approx 0,45s$ для медных проводов [2, 6].

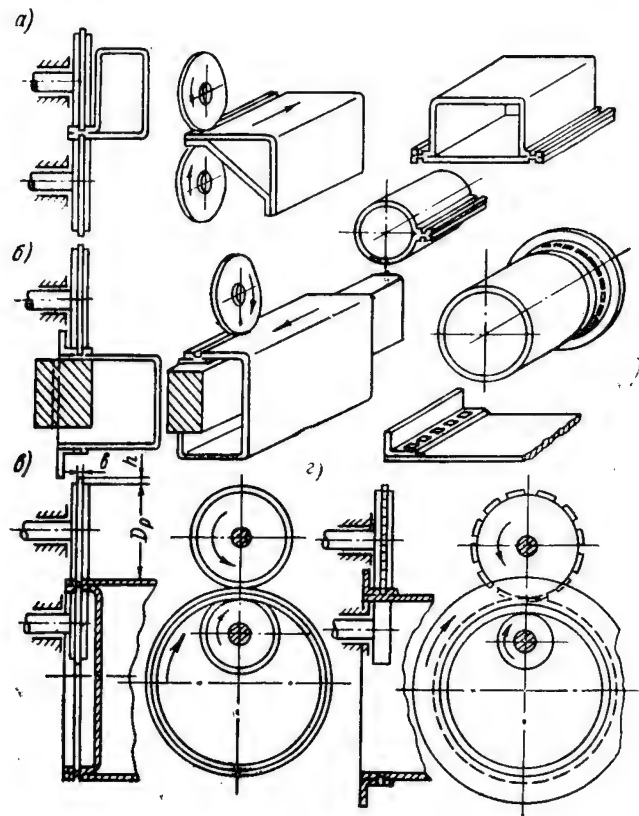


Рис. 3. Схемы различных способов шовной роликовой сварки давлением и примеры соединений

Стыковая сварка обеспечивает прочность места соединения более высокую, чем прочность стержня. Это объясняется упрочнением деформированного металла в зоне сварки.

Оборудованием для осуществления холодной сварки давлением могут служить как специальные высокопроизводительные прессы и рычажные устройства, так и различные имеющиеся на заводах гидравлические, винтовые, эксцентриковые, рычажные и другие прессы с механическим или ручным приводом, с рабочим давлением на пуансоны от 5 до 50 тонн.

В имеющихся прессах и устройствах для крепления прижимов и пуансонов разных размеров и формы могут быть использованы специальные несложные приспособления в виде штампов. При этом до вдавливания пуансонов предварительное прижатие свариваемых элементов может осуществляться гидравлическим или винтовым устройством, а также пружинным или резиновым буфером.

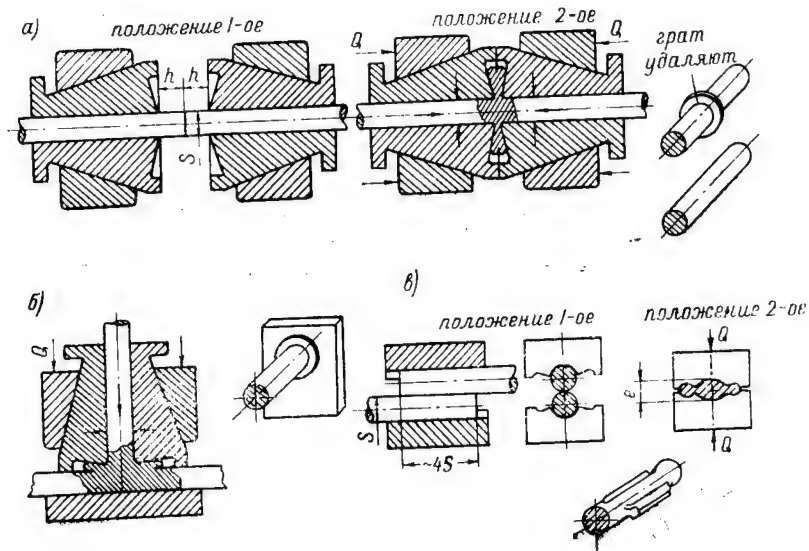


Рис. 4. Схемы способов стыковой сварки

3. Классификация холодной сварки давлением

Обобщение имеющихся данных и анализ конструктивных и технологических признаков различных видов соединений и способов их осуществления позволяют разработать классификацию холодной сварки давлением и систематизировать дальнейшие исследования нового процесса. На рис. 5 приведена классификационная схема холодной сварки давлением.

В зависимости от свойств материала свариваемых элементов холодная сварка подразделена на сварку с непосредственным контактом, сварку с прокладкой и сварку с накладкой. С непосредственным контактом обычно сваривают пластичные металлы и сплавы в отожженном состоянии. Сварку с прокладкой применяют для металлов и сплавов менее пластичных (в закаленном или наклепанном состоянии) и для соединения разнородных металлов. Сварку с накладкой используют для соединения элементов разной пластичности из разных материалов.

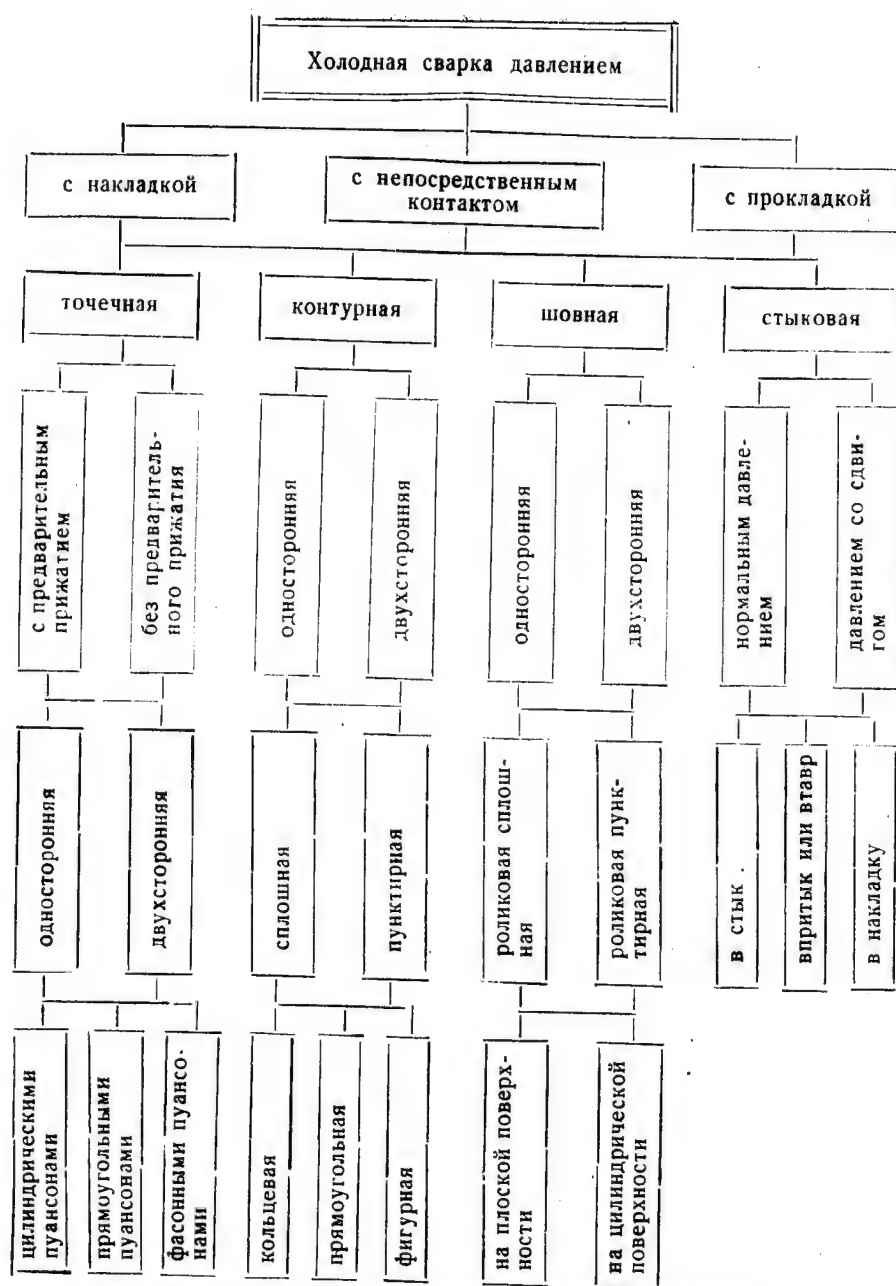


Рис. 5. Классификационная схема холодной сварки давлением

В основу классификации холодной сварки давлением положены конструктивно-технологические признаки. По конфигурации соединений и по способу их осуществления сварка подразделена на точечную, контурную, шовную и стыковую.

Точечная сварка подразделена на сварку с предварительным прижатием свариваемых элементов прижимами и сварку без предварительного прижатия. Сварку осуществляют путем одностороннего и двухстороннего вдавливания в свариваемые элементы пуансонов цилиндрической, прямоугольной и фасонной формы.

Контурную сварку осуществляют путем одностороннего и двухстороннего вдавливания в свариваемые элементы пуансонов, имеющих форму заданного контура шва — кольцевую, прямоугольную или фигурную. В зависимости от формы деформирующих выступов пуансонов выполняют сплошные прочно-плотные или пунктирные прочные швы.

Шовную сварку применяют для соединений большой длины и осуществляют на специальных станках путем прокатки свариваемых элементов между роликами. Применяют одностороннее и двухстороннее вдавливание деформирующих выступов роликов. В зависимости от формы последних выполняют сплошные прочно-плотные или пунктирные прочные швы как на плоской, так и на цилиндрической поверхности.

Стыковую сварку применяют для соединения стержней, полос и проводов сравнительно небольшого сечения и осуществляют путем непосредственного давления свариваемых элементов друг на друга. Свариваемые элементы располагают в стык, втавр или в накладку. Сварку осуществляют на специальных станках или ручными рычажными приспособлениями.

При такой классификации вид сварного соединения определяет тип сварной машины или приспособления и необходимого инструмента.

4. Основные задачи исследования холодной сварки давлением

Разнообразие технологических приемов и формы соединений открывают широкие возможности применения холодной сварки давлением в различных отраслях производства. Однако внедрение в производство этого высокопроизводительного и экономичного способа сварки тормозится отсутствием систематизированных технологических и расчетно-конструкторских параметров процесса сварки для типовых соединений элементов из различных материалов.

Наиболее целеустремленно и последовательно ведется исследовательская работа в специализированной по холодной сварке лаборатории ВНИИЭСО и на заводе «Электрик». Под руководством И. Б. Баранова разработаны технология и оборудование для хо-

лодной сварки алюминия и меди, которые успешно внедряются на заводах электротехнической промышленности.

Изучение холодной сварки давлением других металлов и сплавов до последнего времени велось отдельными исследователями разобщенно без единого направляющего плана при недостаточном обмене опытом.

Для успешного решения проблемы внедрения в производство холодной сварки давлением необходимо направить исследовательскую работу на решение следующих основных задач.

1. Определить для каких материалов и в каком состоянии наиболее целесообразно применять холодную сварку давлением с непосредственным контактом свариваемых элементов, с прокладкой и накладкой и составить таблицу рациональных сочетаний материалов. Разработать критерий для определения свариваемости различных материалов пластической деформацией при комнатной температуре и с подогревом, с учетом различных способов сварки давлением и составить соответствующие таблицы.

2. Определить оптимальные размеры и форму инструмента для каждого способа сварки с учетом свойств материала и толщины свариваемых элементов. При решении этой задачи определить в каждом случае зависимость давления на инструмент от основных параметров процесса. Разработать методику расчета давлений на инструмент, необходимую для проектирования и выбора инструмента и оборудования для холодной сварки давлением.

3. Разработать нормали на конструкции типовых соединений и узлов, выполненных холодной сваркой давлением, с учетом оптимальных размеров инструмента и способов сварки. Разработать расчетно-конструкторские параметры типовых соединений и методику расчета их на прочность. При этом следует учитывать, что прочность точечных, контурных и шовных соединений на срез больше, чем на отрыв. Обратит внимание на то, что разрушение точечных соединений, как правило, происходит не по сечению зоны сварки, а по периметру точки.

4. Разработать конструкцию типового стационарного и переносного оборудования, приспособлений и инструмента для основных видов холодной сварки давлением с электрическим, пневмогидравлическим, ручным и другими видами привода.

Решением этих задач должны заняться специальные лаборатории заводов и НИИ по единому согласованному плану.

Широкое внедрение в производство холодной сварки давлением повысит производительность труда и даст значительную экономию государственных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Семенов, Исследование схватывания металлов при совместном пластическом деформировании, АН СССР, 1953.

2. К. К. Хренов и Г. П. Сахацкий, Холодная сварка металлов. Новые способы сварки и резки металлов, Техиздат УССР, 1953.
3. С. Н. Айнбиндер и Ж. Н. Улит, Сцепление металлов при пластической деформации, Известия АН Латвийской ССР, № 9 (74), 1953.
4. Л. И. Адрианов и Г. М. Орловский, Соединения алюминиевых шин давлением, «Электрические станции» № 2, 1953.
5. И. В. Баранов, Холодная сварка металлов, Изд. ЦБТИ МЭП СССР, М., 1954.
6. К. К. Хренов и Г. П. Сахацкий, Холодная сварка алюминиевых и медных проводов, «Сварочное производство» № 4, 1955.
7. Ю. Д. Первицкий, Технологические вопросы холодной сварки давлением, сборник ЛО НТО Машпрома, книга 40, Машгиз, 1956.
8. И. Б. Баранов, Применение холодной сварки в электротехнической промышленности, «Вестник электропромышленности» № 10, 1956.
9. Ю. Д. Первицкий, Экспериментальное исследование процесса холодной сварки давлением сплавов алюминия, Известия ЛЭТИ, вып. XXIX, 1957.
10. Ю. Д. Первицкий, Роликовая холодная сварка давлением, «Автоматическая сварка» № 2, АН УССР, 1957.

Поступила 30/III 1957 г.

*Канд. хим. наук, доц. М. М. РАЙНЕС
инж. Ю. А. ЛАРИОНОВ*

КАЛИБРОВКА ДАТЧИКА СОЛЕМЕРА

При конструировании приборов для автоматического контроля химических процессов имеет большое значение градуировка приборов по уже заранее найденным параметрам. Так, например, при применении кондуктометрии для автоматического контроля приходится проделывать большую экспериментальную работу, чтобы составить кривые зависимости электропроводности от концентрации и температуры.

Но во многих случаях конструкторы приборов необоснованно требуют повторения большой экспериментальной работы по физико-химическому анализу в то время, когда необходимые для расчетов величины могут быть найдены путем тщательной обработки известных в литературе данных. Примером служит ниже излагаемая работа по градуировке солемера, предназначенного для автоматического контроля содержания поваренной соли в перегнанной морской воде.

1. Расчет электропроводности разбавленных растворов хлористого натрия

Электропроводность разбавленных водных растворов хлористого натрия изучали: Вальден в 1888 г. [1], Оствальд в 1893 г. [1], Кольрауш и Мэльтби в 1900 г. [1], Каленберг в 1901 г. [2], Нойес с сотрудниками в 1903—1912 гг. [5, 6], Джонс в 1912 г. [5], Гендерсон и Келлог в 1913 г. [5], Лоренц и Михаэль в 1921 г. [1], Вальден и Улих в 1923 г. [2, 7], Томас и Марум в 1929 г. [3, 8], Шедловский в 1932 г. [4, 9].

Наиболее надежные данные у Шедловского, Вальдена, Улиха и Нойеса. Они получены при более тщательной постановке опытов.

2. Зависимость χ от температуры

Ввиду того, что наиболее изученной при различных температурах концентрацией является 0,002 н. (117 мг/л NaCl) на рис. 1 изображена политерма для этой концентрации. Зависимость удельной электропроводности NaCl от температуры при этой концентрации может быть выражена квадратным уравнением

$$\chi_t = \chi_0 [1 + \alpha(t^\circ - t_0^\circ) + \beta(t^\circ - t_0^\circ)^2]. \quad (1)$$

В качестве исходной величины электропроводности χ , принята проводимость при 25°C, так как при этой температуре производилось наибольшее количество исследований. Значения α и β нами определены из величин удельной проводимости при 0 и 100°C по данным Вальдена и Улиха [2, 7]. Предлагаемое нами уравнение:

$$\chi_t = \chi_{25} [1 + 0,0202(t^\circ - 25) + 6 \cdot 10^{-5}(t^\circ - 25)^2]. \quad (2)$$

Результаты проверки точности этого уравнения показывают, что в широком интервале температур (0—140°C) и концентраций (0,0005—0,002 н.) выведенное уравнение для практических целей достаточно точно.

Для расчета температурной компенсации желательно, чтобы удельная электропроводность была линейной функцией температуры.

Рис. 1. Политерма электропроводности 0,002 н. NaCl

Нами для этой цели предложено приближенное линейное уравнение

$$\chi_t = \chi_{25} [1,05 + 0,022(t^\circ - 25)]. \quad (3)$$

Результаты проверки точности этого приближенного уравнения показывают, что в широком интервале концентрации (0,0005—0,002 н.) и температур (0—140°C) приближенное линейное уравнение дает в среднем погрешность $\pm 5\%$.

3. Зависимость λ от концентрации

Зависимость между эквивалентной электропроводностью и концентрацией NaCl, выраженной в г-экв/л при 25°C, может быть выражена уравнением [4]

$$\lambda_{25} = 126,42 - 88,53 \sqrt{C} + 89,5 C (1 - 0,2274 \sqrt{C}). \quad (4)$$

Для концентраций NaCl, выраженных в мг/л, удобнее пользоваться преобразованным уравнением

$$\lambda_{25} = 126,42 - 0,3665 \sqrt{C_1} + 0,00153 C_1 (1 - 941 \cdot 10^{-6} \sqrt{C_1}).$$

Зависимость удельной электропроводности от концентрации NaCl при 25°C, рассчитанная по величине λ_{25} , графически изображена на рис. 2.

При концентрации NaCl от 0 до 100 мг/л удельная электропроводность является приблизительно линейной функцией концентрации и может быть выражена уравнением

$$\lambda_{25} = 2,12 \cdot 10^{-6} C,$$

где C — мг/л NaCl.

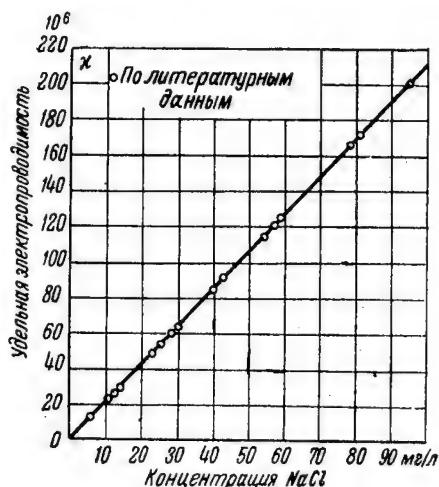


Рис. 2. Изотерма электропроводности NaCl при 25°C

Сравнение величин удельной электропроводности, полученных Шедловским [9] и рассчитанных по предложенному нами линейному уравнению, показывает, что в интервале концентраций от 11 до 119 мг/л NaCl расхождение не превышает 1,3%.

Пользуясь (2) и значениями λ_{25} , вычислены значения для температур: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 и 110°C и концентраций: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 и 100 мг/л NaCl.

По полученным данным построены изотермы и политермы электропроводности (рис. 3 и 4).

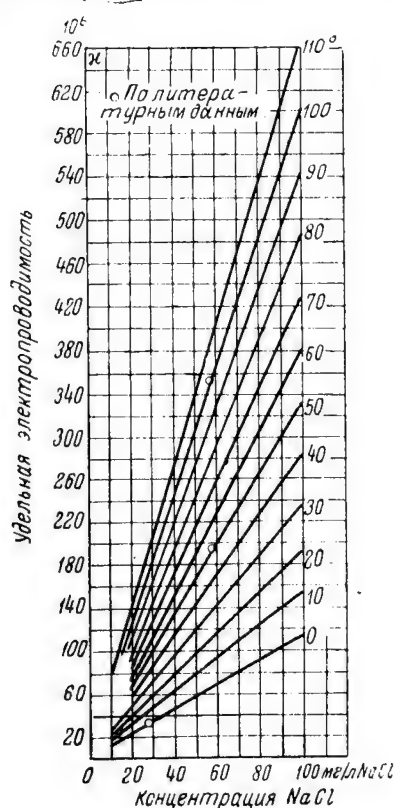


Рис. 3. Изотермы электропроводности NaCl

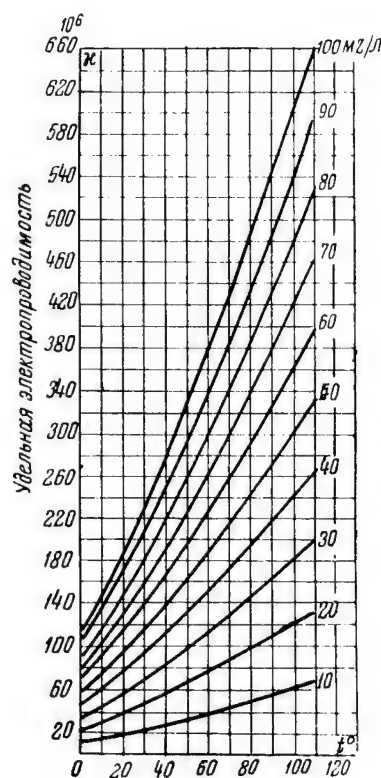


Рис. 4. Политермы электропроводности NaCl

4. О применении расчетных данных для градуировки прибора

Градуировку приборов для измерения концентрации растворов по их электропроводности можно производить двумя способами: посредством образцовых растворов и с помощью образцовых магазинов сопротивления, вычисляя сопротивления для ряда заданных по шкале концентраций, пользуясь величиной «постоянной» датчика и значениями удельной электропроводности растворов.

При серийном выпуске приборов, практическое значение имеет только второй способ градуировки. Но при прохождении через датчик переменного тока имеется ряд явлений [10, 11, 12], вызы-

вающих сдвиг фаз между током и напряжением в датчике, что может обусловить собой у прибора, отградуированного с помощью образцовых магазинов сопротивлений, погрешность измерений, достигающую в некоторых случаях до нескольких десятков процентов.

Основной причиной сдвига фаз является поляризация электродов, которая, в свою очередь, определяется частотой, плотностью тока и напряжением, а также концентрацией электролита и материалом электродов.

Очевидно, что погрешность, обусловленная сдвигом фаз, может быть сведена до допустимой минимальной величины путем соответствующего выбора плотности тока, напряжения, сопротивления датчика, материала электродов и т. д. Влияние частоты и некоторых других факторов может быть элиминировано также путем определения постоянной датчика в тех же условиях (частота и др.), в которых будет эксплуатироваться прибор [11, 13, 14, 15].

Для автоматического измерения электропроводности обычно пользуются металлическими датчиками, одним из электродов которых большей частью служит стенка сосуда, а второй электрод изготавливается из того же материала, что и сосуд. Примером является датчик-измеритель концентрации NaCl на 2—20 мг/л, выпускаемый Центральным Котлотурбинным институтом (солемер ЦКТИ).

Фирмой Сименс и Гальске выпускался клеточный датчик Шене, в котором один электрод образован внешней металлической сеткой, второй — находящимся внутри клетки штифтом. Эйкен [15] указывает, что подобное устройство не зависит ни от металлических частей, находящихся снаружи клетки (стенки трубки и т. д.), ни от величины внешнего объема жидкости.

Нами был испытан подобный электролитный сосуд (датчик). Сосуд состоял из двух стальных электродов — внешнего и внутреннего. Внешний электрод выполнен в виде цилиндра с прорезями, в середине которого помещается цилиндрический стержень, служащий вторым электродом. Рядом с электродами в головке датчика укреплена гильза для термометра сопротивления. Электроды с гильзой помещены в металлический кожух со штуцерами для входа и выхода электролита. Кожух, гильза и внешний электрод короткозамкнуты и заземлены.

5. Экспериментальная проверка и оценка датчика

Испытание датчика преследовало следующие цели:

1. Проверить влияние на сопротивление датчика металлического корпуса, соединенного с наружным электродом.
2. Проверить влияние заземления корпуса датчика на сопротивление последнего.

3. Проверить постоянство «постоянной датчика» при различной концентрации раствора NaCl.

Все измерения производились с мостиком фирмы Лиде и Нортруп с гальванометром переменного тока при частоте 50 гц. Измерения производились при температуре окружающего воздуха, которая фиксировалась с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Растворы готовились из перекристаллизованного химически чистого NaCl.

Электропроводность воды для приготовления растворов определялась в сосуде с платиновыми электродами и в измеренное сопротивление датчика (R_1) вносились соответствующая «водная поправка» и поправка на сопротивление подводящих проводов (0,07 ом).

Удельная электропроводность при температуре опыта для каждой концентрации рассчитывалась по уравнению (1).

Величины K_{25} для каждой концентрации взяты из справочника [4]. Постоянная датчика рассчитывалась по формуле

$$K = K_{25} R_2,$$

где R_2 — сопротивление датчика после внесения поправок.

Влияние корпуса датчика определялось путем измерения сопротивления между электродами в стеклянном стакане тех же размеров, как и металлический корпус. Результаты измерений приведены в таблице, из которой видно, что:

1. Металлический корпус не оказывает существенного влияния на сопротивление датчика. При концентрации 58,46 мг/л NaCl сопротивление датчика с корпусом и без корпуса совпадают в пределах точности измерения (расхождение 0,2%).

2. Заземление корпуса датчика на его сопротивление оказывает незначительное влияние (0,6—0,7%).

3. С уменьшением концентрации растворов «постоянная датчика» уменьшается. При уменьшении концентрации NaCl с 0,01 н. до 0,001 н. (в 10 раз) «постоянная датчика» уменьшается на 1,3%. Для практических целей автоматического контроля такая погрешность является несущественной.

Выводы

1. Предложены два уравнения (точное и приближенное) для расчета удельной электропроводности растворов поваренной соли, содержащих до 0,002 н. — NaCl, в интервале температур от 0 до 140°C .

2. Предложено упрощенное уравнение для расчета удельной электропроводности растворов NaCl в зависимости от концентрации от 0 до 0,002 н. при температуре 25°C .

Таблица

Концентрация NaCl	Сосуд	Зазем- ление корпуса	R_1 измерен- ное, ом	Удельная электропро- водность воды, ом ⁻¹ · см ⁻¹	Водная поправ- ка в % от R_1	R_2 исправ- ленное, ом	$t^{\circ}\text{C}$	γ_t	K
0,1н. (5846 мг/л)	Стакан	—	9,45	$1 \cdot 10^{-5}$	0,09	9,40	21,2		
"	Корпус	нет	9,40	"	"	9,35	"	0,009849	0,09209
0,01н. (584,6 мг/л)	Корпус	нет	57,8	"	0,9	53,4	21,2	0,001098	0,06383
"	"	есть	58,2	"	"	58,8	"		
0,002н. (116,9 мг/л)	Стакан	—	279	"	4,5	292	19,9		
"	Корпус	нет	275	"	"	288	"	0,000220	0,06336
0,001н. (58,46 мг/л)	Стакан	—	520	$5 \cdot 10^{-6}$	4,5	542	21,7		
"	Корпус	нет	521	"	"	543	"	0,000116	0,06299
"	"	есть	524	"	"	546	"		

3. Рассчитаны значения удельной электропроводности для концентрации 10—100 мг/л при температурах от 0 до 110°C и построены соответствующие изотермы и политермы.

4. Показано, что для градуировки прибора солемера теоретически рассчитать сопротивление датчика для концентрации NaCl от 0 до 100 мг/л возможно, если предварительно определить «постоянную» датчика по стандартному раствору NaCl, концентрация которого не должна превышать 0,01 н. (0,5846 г/л NaCl).

ЛИТЕРАТУРА

1. Landolt—Börnstein, Phys.—chem. Tabellen II, 1078, 1087, 1088, 1923.
2. То же, 595, 605, 1927.
3. То же, II, 1051, 1931.
4. То же, III, 2039, 1936.
5. Техническая энциклопедия, Справочник физических, химических и технологических величин, IV, 357, 1930.
6. Нойес, Z. Phys. chem., В. 70, 335, 1910.
7. Вальден и Улих, то же, В. 106, 49, 1923.
8. Томас и Марум, то же, В. 143, 191, 1929.
9. Шедловский, J. Am. chem. soc. 54, 1441, 1932.
10. Эндер, Z. Electrochem., 43, 4, 1937.
11. Туричин, «Автоматика и телемеханика», 1, 7, 1939.
12. Джонс и Боллингер, J. Am. chem. soc., 53, 411, 1931.
13. Беленький, «Заводская лаборатория», 4, 349, 1941.
14. Шпигель, ЖОХ, 16, 2077, 1940.
15. Эйкен, Физико-химический анализ в производстве, 1936.

Поступила 18/VII 1956 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр
Н. П. Ермолин. К вопросу обобщенного рассмотрения принципа действия электрических машин	3
Н. П. Ермолин. Основы расчета маломощной реверсивной установки с большим маховым моментом на валу исполнительного электродвигателя	9
И. П. Жерихин. Условия самовозбуждения синхронного генератора	27
Б. З. Нестеров. Расчет и экспериментальное определение индуктивных сопротивлений машин повышенной частоты	34
В. Н. Шевцов. О целесообразности сочетания эксплуатации гидроэлектростанций с отопительными теплоэлектроцентралями	41
К. В. Булгаков. О рациональном составлении и выборе энергетических вариантов	50
П. Н. Матханов, Ю. А. Петров. Схема для последовательного соединения коммутирующих приборов в мощных высоковольтных генераторах прямоугольных импульсов	65
Е. А. Хагемейстер. Методика расчета динамики процесса ускоренного АПВС крупных гидрогенераторов	74
П. Н. Матханов. Синтез дискретных цепей задержки на основе приближения гиперболических функций первыми множителями бесконечных произведений	85
А. В. Башарин. Графический метод расчета дроссельного магнитного усилителя для системы авторегулируемых электроприводов постоянного тока	93
Б. В. Шамрай. Графическое построение нагрузочных характеристик двухтактных магнитных усилителей с обратной связью	105
Е. А. Старосельцева. Измерение удельных сопротивлений изоляции порядка 10^{18} ом·см	112
А. С. Васильев. Анализ переходных процессов в цепи ионного преобразователя	118
Ю. М. Казаринов, С. В. Толоконников, Ю. А. Коломенский. О выборе некоторых параметров схемы временного дискриминатора	136
В. И. Никитенко. Частотный дискриминатор с широкой полосой пропускания	150
В. И. Винокуров. Исследование возможности дистанционного измерения температуры нагретых тел с помощью радиометра	157
	291

	Стр.
В. Н. Качурин. Основы расчета электронного модулятора малых напряжений	166
Е. Г. Волков, К. И. Крылов. Формирование электронного пучка магнитным полем, искаженным в области катода ферромагнитными телами	185
А. Л. Игрицкий. Теория одиночной электростатической линзы	195
Л. А. Дудник. К вопросу о погрешностях при измерении параметров электронных ламп	211
Н. И. Постоева. О приближении функций в свете новой вычислительной техники	222
А. Е. Гельман. О периодических, квазипериодических и ограниченных решениях одного класса линейных дифференциальных уравнений	231
С. Г. Гуревич. К решению смешанной задачи для прямоугольной пластинки	239
О. К. Зевахин. Изгиб консоли прямоугольного сечения, составленной из трех трансверсально-изотропных слоев, под действием поперечной силы, приложенной к незакрепленному концу	252
И. А. Назаров. Решение задачи о кручении одного стержня некруглого сечения	267
Ю. Д. Первицкий. О классификации и задачах исследования холодной сварки давлением	271
М. М. Райнес, Ю. А. Ларионов. Калибровка датчика солемера	283

*Известия
Ленинградского
Электротехнического
института
имени В. И. Ульянова (Ленина)*

*Ответственный редактор Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ
Редактор В. И. ЕВСЕЕВ
Технический редактор В. И. ЕВСЕЕВ Корректор А. П. ВИШНЕВКИНА*

Сдано в производство 14-XII-1957 г.	Подписано к печати 26-VI-1958 г. М 04608
Формат бумаги 60 x 92 1/16.	Печ. л. 18,25 + 1 вклейка. Уч.-изд. л. 18,5.
Тираж 500 экз.	Заказ № 1499а. Цена 13 руб.

Типография ЛЭТИ

STAT

Page Denied

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ СБОРНИК

X

ГЕОМОРФОЛОГИЯ
И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ

STAT

Page Denied

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р

ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО СОЮЗА ССР

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Х

ГЕОМОРФОЛОГИЯ
И
ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА . 1958 . ЛЕНИНГРАД

Главный редактор
академик *Е. Н. ПАВЛОВСКИЙ*

Ответственный редактор
доктор географических наук *Н. Н. СОКОЛОВ*

Посвящается светлой памяти

ЯКОВА САМОЙЛОВИЧА

ЭДЕЛЬШТЕЙНА,

первого председателя

Геоморфологической комиссии

Географического общества

ОТ РЕДАКЦИИ

Настоящий сборник является вторым «Географическим сборником», посвященным геоморфологии и палеогеографии (первый см.: Географический сборник, I. М.—Л., 1952). В нем собраны работы разнообразного характера о геоморфологических и палеогеографических условиях в различных частях Советского Союза.

Большая часть статей в сборнике содержит результаты наблюдений авторов. Некоторые статьи составлены на основании критического изучения литературных данных.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . X

ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО СОЮЗА ССР

З. А. СВАРИЧЕВСКАЯ

ГЕОМОРФОЛОГИЯ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

Общая характеристика

Северный Казахстан имеет весьма разнородное геоструктурное строение. В Центральной его части располагается крупное древнее ядро, так называемая Кокчетавская глыба, представляющая собой выступ докембрийского фундамента. Это ядро окружено каледонскими складчатыми структурами, получившими особенно широкое развитие в восточной части.

На юге в рассматриваемый район входит своей северной частью другая крупная структурная область — обширная Тенизская впадина, выполненная верхнепалеозойскими, мезозойскими и кайнозойскими осадками.

К северу, западу и юго-западу происходит погружение складчатых структур под толщу рыхлых отложений Тургайской и Западно-Сибирской впадин.

Соответственно и рельеф района отражает геоструктурный план его строения. Наиболее повышенный мелкосопочный и мелкогорный рельеф (с высотами 400—500 м, наибольшая высота — гора Синюха — 887 м) приурочен к древним докембрийским и каледонским структурам, очевидно и в последующее время сохранившим тенденцию к поднятиям, судя по отсутствию более молодых комплексов пород, участвующих в их геологическом строении. Окраины этих древних структур, представляющие собой области погружения и аккумуляции верхнепалеозойских и мезокайнозойских осадков, характеризуются равнинным рельефом с высотами от 130 до 200 м. Речная сеть имеет радиальное расположение, расходясь во все стороны от группы водораздельных возвышенностей — гор Зерендинских и Кокче-тау, подчеркивая этим обособленность и самостоятельность Кокчетавской глыбы.

Своеобразие хода геологического развития страны определило характерные черты современного рельефа, в основной своей части денудационного. По данному району имеется сравнительно большая литература, в которой содержатся некоторые сведения и по геоморфологии района.

Основные черты геологического строения

Анализ геологического строения показывает, что Кокчетавская глыба — древнейшая суша, была окружена геосинклинальными областями в нижнем палеозое. Складчатые движения, в таконское время нарастившие сушу и носившие характер альпийских, имели место только до девона. В дальнейшем движения происходили уже в условиях явно выраженной жесткости фундамента (Кассин, 1951, 1952; Шатский, 1951).

Континентальное развитие прерывается в конце турнейского времени нижнего карбона, когда на обширных территориях, не только Северного Казахстана, но и всей суши, произошли опускания, вызвавшие одну из величайших в истории Земли трансгрессий.

Вновь континентальный режим наступает с середины среднего карбона. Опускание Тенизской впадины в пермское время вызвало накопление в ней осадков, но уже платформенного типа. Породы, относимые к мезозою, занимают незначительную площадь. Они представлены, с одной стороны, кластическими осадками, выполнившими грабенообразную депрессию в низовьях Нижнего Бурлука, возникшую, очевидно, еще перед верхним триасом (Кассин, 1947), с другой стороны, корой выветривания. Осадки, выполнившие грабен Н. Бурлука, относятся к верхнему триасу и юре. Возраст самых верхних конгломерато-галечниковых отложений, покрывающих угленосную юру, неизвестен; может быть, они уже относятся к мелу. Кора выветривания очень широко развита, занимая значительные пространства водораздельных равнин и достигая мощности до 70 м. Лучше всего она сохранилась в депрессиях, залегая под слоем третичных и четвертичных осадков.

Этапы позднейшего, кайнозойского развития запечатлены также в комплексе осадков во впадинах, окружающих древний остов, коррелятивных периодам размыта денудационной поверхности.

Стратиграфия новейших отложений, из которых самыми древними являются морские верхнемеловые, построена главным образом на основании изучения керна буровых скважин и естественных обнажений.

Буровые скважины, расположенные вдоль северного погружения древней платформы, в пределах уже южной части Западно-Сибирской низменности (ст. Тайнча, Киялы, Макушино и др.) вскрыли комплекс морских осадков. В основании их залегают серые (от светлых до темных) глины и глинистые пески верхнего мела. Выше лежат кварцевые и глауконитовые пески, песчанистые глины и опоки с зубами акул и пластинчатожаберными, относимые уже к низам палеогена (эоцену). Они перекрываются прекрасно выраженной в разрезе морской толщей осадков чеганского моря, охватывающей время с верхнего эоцена до нижнего олигоцена включительно. Толща хорошо фаунистически охарактеризована и может рассматриваться в качестве стратиграфического репера. Литологически всюду она представлена однообразными зеленовато-серыми глинами с листоватой текстурой. Аналогичный разрез наблюдается и вдоль западного погружения древней платформы, западнее Ишима, уже в пределах Тургайской впадины. Непосредственно вблизи древнего берега чеганского моря мощность толщи обычно резко сокращается и глины часто замещаются уже прибрежными фациями (что и подтверждает действительное положение древнего берега). Так, конгломераты, содержащие чеганскую фауну, были описаны на правобережье р. Ишим (по р. Бетеке) Ю. А. Орловым. Аналогичная прибрежная фация отмечена также западнее оз. Селеты.

На поверхности древнего пенеппла встречаются во многих местах развалы щебня и глыб кварцевых песчаников светлой (белой, желтой и розовой) окраски. Эти песчаники представляют собой континентальные фации и, судя по встречающейся в них флоре, имеют эоценовый возраст. Мощность песчаников незначительна: обычно менее 10 м.

В начале среднего олигоцена начавшиеся тектонические движения вызвали регрессию моря, и все последующие осадки имеют уже континентальное происхождение. Средний олигоцен был почти полностью

смыт в период, предшествовавший отложению осадков верхнего олигоцена и характеризовавшийся продолжением тектонических движений. В центральных же частях области прогибаний, западнее и восточнее района, эти отложения широко развиты.

Верхний олигоцен значительно развит. Осадки представлены (например, в Тургайской впадине) в основном песчаными и песчаниково-конгломератовыми фациями внизу разреза (чаграйская свита Приаралья) и пестроцветными глинами, имеющими очень широкое распространение, иногда лежащими с разрывом непосредственно на палеозое (наурзумская свита Приаралья). Местами эта свита постепенно переходит тоже в глинистую свиту (аральскую свиту Приаралья), уже нижнего миоцена. Пестроцветные глины и пески верхнего олигоцена были вскрыты скважинами в котловинах озер Улькун-карой и Теке, где они достигают 45 м мощности. У пос. Веселовки (в 25 км к западу от оз. Келет-сор) мощность их 72 м; они представлены чередующимися темными глинами, галечниками и песками. Многочисленными скважинами они вскрыты на правобережье Ишима (ур. Ольджибай, оз. Кунды-куль и др.).

Все эти разрезы вскрыты лишь во впадинах, окружающих древнюю Кокчетавскую платформу, представлявшую собой сушу, почти в течение всего палеозоя с каледонского времени. На поверхности этой древней суши верхнеолигоценовые осадки сохранились небольшими участками.

Верхнеолигоценовые отложения характеризуются преобладанием светлых окрасок, интенсивно отбелены, выщелочены. В песках, среди обломочного материала, преобладающим является кварц, обычно в неокатанных зернах. Встречающиеся полевошпатовые частицы, как правило, каолинизированы (Лавров, 1953). Все это свидетельствует о периоде коррозирования, имевшем место в верхнем олигоцене, особенно в его вторую половину. Местами олигоценовая кора выветривания совмещена с более древней, мезозойской корой, местами же она развилась на эрозионных поверхностях уже более молодого, средне- и верхнеолигоценового возраста.

Верхнеолигоценовые отложения, лежащие маломощным плащом на поверхности нижней ступени древней суши, очевидно, были принесены временными потоками и плоскостным смывом с более приподнятых участков суши.

Пониженная окраина древней суши покрыта верхнеолигоценовым плащом (местами значительно денудированным) более или менее достоверно только вдоль Тургайской впадины. Возможно, что верхнеолигоценовые осадки лежат на поверхности древней суши и вдоль ее северной окраины (обычно эти отложения относят к неогеновым).

Неогеновые отложения в отличие от других районов представлены преимущественно серо-зелеными глинами. В основании залегает очень широко распространенная, стандартного облика аральская свита, характеризующаяся светло-зелеными и буровато-зелеными глинами с известковистыми конкрециями, марганцовистыми бобовинами и друзами гипса. Возраст свиты определяется (Яншин, 1953) как нижнемиоценовый, включая и гельветский ярус среднего миоцена.

Аральская свита связана постепенными переходами как с нижележащей свитой пестрых глин верхнего олигоцена, так и с вышележащими зелеными и желтыми глинами плиоцена.

Неогеновые отложения лежат маломощным плащом на поверхности древней суши по ее северной окраине, а также местами и вдоль ее западной границы. Судя по преимущественно глинистому составу пород, сла-

гающих покров неогена на описанных участках, можно предполагать, что они образовались в результате озерных и речных разливов.

На повышенной части древнего пенеплена неогеновые отложения, по данным Е. В. Шанцера, выполняют днища древних ложбин (например, ложбину оз. Айдабуль), достигая мощности 10—15 м.

Четвертичные отложения представлены покровными суглинками, имеющими пролювиально-аллювиальный генезис (иногда делювиальный). Они занимают обширные водораздельные пространства, где местами имеют большую мощность. В речных долинах развиты аллювиальные отложения.

Нижнечетвертичные отложения слагают плоско-увалистые возвышенности, образованные более или менее однородными суглинками желто-бурого цвета, карбонатными, слабо слоистыми, с характерной вертикальной отдельностью. Книзу толща становится более песчанистой, и в основании появляются линзы и прослои песка, что свидетельствует о более влажных условиях аккумуляции осадков. Нижнечетвертичный возраст суглинков подтверждается найденной в них фауной млекопитающих. Мощность их достигает от 5—7 до 20—25 м (по левобережью Ишима).

Среднечетвертичные отложения встречаются как в современных долинах, так и в древних ложбинах стока. Одна из ложбин идет из павлодарского Прииртышья, где образовалась за счет слияния многочисленных рукавов, несших талую воду с ледников Алтая, другая — по линии озер Горькой линии, из района Омска, и носит название Камышовского лога. Восточнее Ишима они сливаются, и, пересекая долину Ишима, ложбина уходит в юго-западном направлении, в долину Убоган. Среднечетвертичный возраст имеют также водораздельные суглинки, лежащие на Ишимо-Колутонском водоразделе, о чем свидетельствует находка *Elephas trogontherii* в аналогичных суглинках в районе долины р. Ащилы, правого притока Ишима. Сравнительно древний возраст покровных суглинков подтверждается и приращением к поверхности, сложенной ими, верхней, верхнечетвертичной террасы Аккан-Бурлука (высотой 20—25 м).

Верхнечетвертичные отложения слагают две надпойменные террасы в долинах рек бассейнов Ишима и Иртыша.

В районе г. Павлодара из второй террасы Иртыша была собрана многочисленная фауна млекопитающих, подтверждающих верхнечетвертичный возраст террасы. Мамонтовая фауна была встречена и в первой надпойменной террасе, что свидетельствует и о ее верхнечетвертичном возрасте. Аллювиальные осадки представлены тонкозернистыми песками, во второй террасе с прослоями гравия, в первой террасе с погребенными почвенными горизонтами.

В притоках р. Ишим, как на его меридиональном участке (рр. Бурлук, Шарык, Конур-су и др.), так и на широтном, развиты две террасы, в осадках которых (преимущественно песчаных и суглинистых) встречена та же верхнечетвертичная фауна (в 7 км к юго-востоку от Акмолинска найдены остатки *Bos primigenius*).

Современные аллювиальные отложения слагают две пойменные террасы, особенно хорошо развитые в долине Ишима, на его широтном участке. Представлены они суглинистой пойменной фацией, с линзами гравийно-галечного материала. Широко распространены и элювиально-делювиальные породы.

Интрузивные породы очень широко развиты, причем наблюдаются интрузии разного возраста: от допалеозойских до позднегерцинских.

Тектоническая структура района представляется в следующем виде. В южной половине располагается широтно вытянутый анти-

клинорий — Кокчетавская глыба. Он испытывал в палеозое непрерывные колебательные движения после геосинклинальных складчатых. О его постоянных колебаниях свидетельствует наличие дислоцированных осадков по окраине глыбы (вплоть до мезозойских в «бурлукском» грабене); о постоянной же тенденции к поднятию говорит отсутствие морских отложений, за исключением силурийских и нижнекарбоновых, наблюдающихся по окраине глыбы. На интенсивное горообразование в последующее, например в герцинское время, указывают наличие обширнейших ранне- и позднегерцинских интрузий гранитной магмы, а также грубозернистый, существенно песчанистый характер осадков и присутствие среди них прослоев конгломератов в толщах девона, карбона и перми.

Тектонические движения в начале мезозоя, видимо, были незначительными, о чем свидетельствует наличие рыхлой коры выветривания, кое-где сохранившейся под кластическими породами в грабенах и указывающей на сравнительно равнинные условия ее образования.

Позднее имели место интенсивные нарушения земной коры. На это указывают интенсивно смятые триас-юрские мощные грубокластические осадки в грабене в низовьях р. Н. Бурлук, что свидетельствует о сильно расчлененном рельефе, о бурных потоках, в которых они отлагались. О еще более поздних движениях и их характере можно судить только лишь на основании более или менее обстоятельного анализа современного рельефа.

Геоморфологическое строение

В геоморфологическом отношении район представляет собой обособленную территорию, своеобразную по рельефу и истории развития. В центре — это древнее ядро с постоянной тенденцией к поднятию. По периферии располагается более молодая, каледонская и герцинская, суша, которая в краевых частях испытывала незначительные погружения в кайнозой, а также входят обширные платформенные впадины с глубоким погружением палеозойского фундамента — поверхности древней суши. Впадины выполнены рыхлыми мезо-кайнозойскими осадками. Поднятия небольшой амплитуды в конце неогена и начале четвертичного времени обусловили начало расчленения аккумулятивной поверхности осадков, выполняющих впадины.

Соответственно концентрическому расположению основных геоструктурных элементов также зонально располагаются и основные типы рельефа.

Основные категории рельефа района, занимающие наибольшую площадь, представляют денудационный рельеф допалеозойско-палеозойской платформы и структурно-денудационный рельеф Тургайской и Западно-Сибирской плит. В качестве переходной области между ними является допалеозойско-палеозойская платформа с маломощным, местами смытым покровом кайнозойских континентальных осадков.

В настоящее время приходится считать, что погружение древней платформы в сторону прилегающих — Западно-Сибирской и Тургайской впадин — происходит постепенно. Тем не менее на общем фоне плавного погружения намечаются участки с более крутыми уклонами. Так, В. К. Василенко (1951) устанавливает наличие уступа, именуемого им «Карой-ской тектонической линией», протяжением свыше 1500 км, который протягивается от г. Серова на восточном склоне Урала до широты г. Семипалатинска и уходит в Зайсанскую котловину.

Каройский уступ на прослеженных участках имеет уклоны всего 1—1.5° (например, у г. Тюмени устанавливается погружение поверхности фундамента на протяжении 50 км с 800 до 1500 м). В современном рельефе поверхности уступ здесь не отражен, но отчетливо устанавливается бурением и геофизическими исследованиями. Трудно принять этот уступ за разлом, основываясь лишь на данных очень редких скважин; однако на основании изучения обнаженных участков древней платформы можно думать, что разломы влияли на деформацию поверхности. Как указывает Е. Д. Шлыгин (1932), фундамент к северу от г. Кокчетова опускается ступенями, обусловленными, видимо, сбросами, имеющими широкое протяжение, но с небольшой амплитудой перемещения. Аналогичное постепенное погружение платформы отмечается также и в сторону Тургайской впадины. Есть указание на наличие на погребенной поверхности фундамента, к западу от Ишима, депрессий (возможно, грабен), выполненных юрскими осадками, вытянутыми в северо-восточном направлении.

Рельеф поверхности, как это наблюдалось и в некоторых других районах, имеет ступенчатое строение. Ступенчатость обусловлена различной интенсивностью поднятия отдельных участков поверхности, частью прикрытых плащом кайнозойских осадков. (особенно в областях относительно опущенных). Ступени имеют часто значительную протяженность. Верхняя, наиболее приподнятая ступень представляет собой древний пенеплен, образующий пологое «вздутие», она усложнена локальными, более мелкими «вздутиями», выраженными в рельефе в виде мелкосопочника, мелкосопочных нагорий и мелкогогорий. Рельеф средней, несколько опущенной ступени, а также нижней, структурной, является более однообразным, равнинным.

По степени тектонической приподнятости и соответственно денудационной расчлененности выделяются следующие категории рельефа: 1) денудационно-тектонический горно-холмистый, 2) денудационный равнинный, 3) эрозионный долинно-котловинный рельеф. Среди этих категорий рельефа выделяются следующие элементы рельефа: 1) мелкогорье, 2) мелкосопочные нагорья, 3) мелкосопочник водораздельный, 4) цокольная равнина, 5) откопанная цокольная равнина, 6) цокольная равнина с малоомощным плащом кайнозойских осадков, 7) структурная равнина, 8) мелкосопочник склонов, 9) долины, 10) озерные котловины.

Денудационно-тектонический горно-холмистый рельеф. Мелкогорье. Единственным, но необычайно типичным, характерным является мелкогорье гор Кокче-тау, расположенное между курортом Боровое и г. Щучинском.

В геологическом отношении мелкогорье представляет собой выступ одного из куполов обширного гранитного батолита каледонского возраста (рис. 1, 1). Гранитный массив, сложенный гранитами биотитовыми, биотито-роговообманковыми до grano-диоритов, имеет кольцевое строение. В центральной части купола они характеризуются крупнокристаллической структурой, переходя в гранит мелкокристаллической структуры, который образует дугообразный пояс, охватывающий купол с запада полукольцом. Предполагается, что мелкокристаллический гранит приурочен к кольцевой дайке, внедрившейся в более поздние фазы каледонского цикла. Горы, вытянутые в виде хребта, приурочены именно к этой кольцевой дайке, начинаясь от г. Щучинска и заканчиваясь горами Булюк-тау, образующими перешеек между озерами Большое Чебачье и Боровое. Центральная часть купола представляет собой почти полностью выров-

ненный пенеплен, на поверхности которого лишь местами обнажаются небольшие выходы гранитов, часто разрушенных и превращенных в кору выветривания.

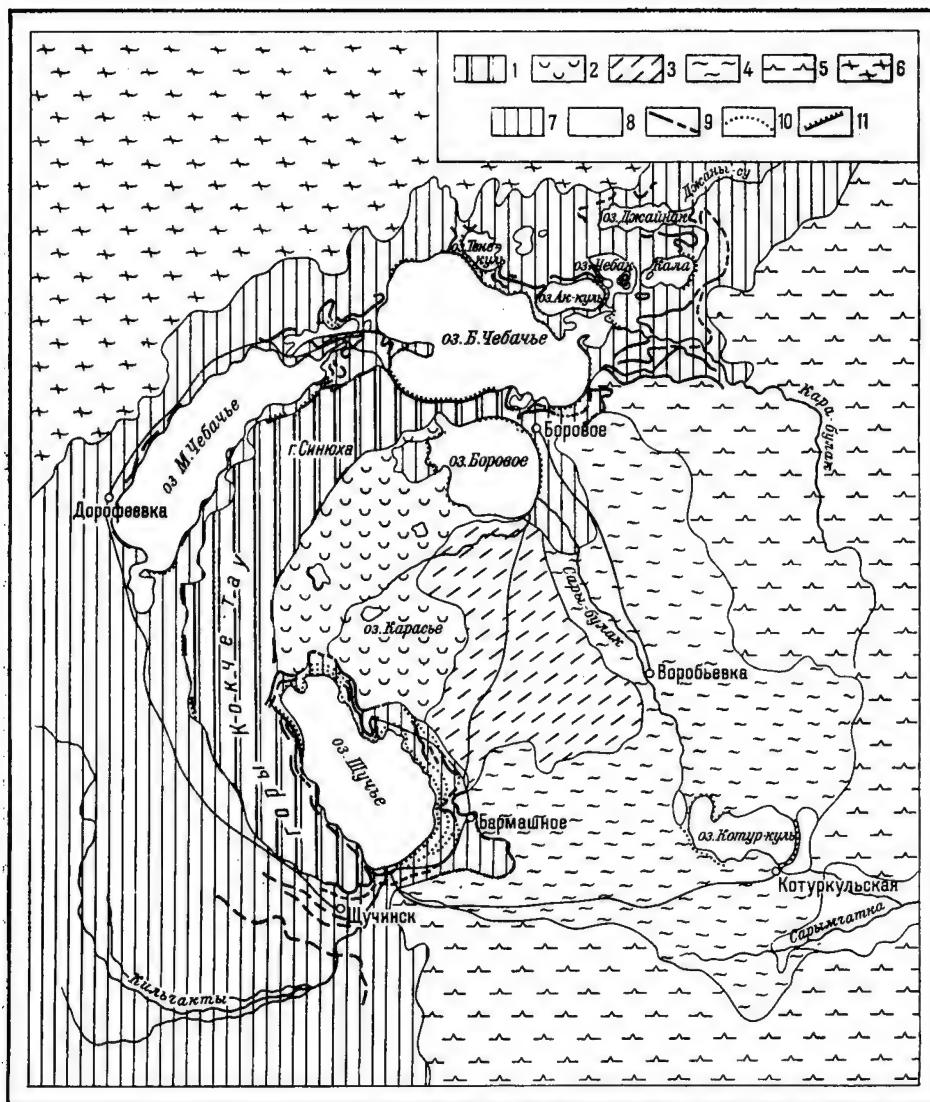


Рис. 1. Геоморфологическая карта окрестностей гор Кокче-тау.

1 — мелкогорье, 2 — холмисто-котловинный рельеф, 3 — холмистая равнина, 4 — пенеппен, 5 — мелко-
сопочник, 6 — расчлененный пенеппен, 7 — озерные террасы, 8 — ложбины стока, 9 — озерные террасы
10 — береговые валы, 11 — линии предполагаемых разломов.

Горы Кокче-тау резко поднимаются над прилежащей к ним с внешней и внутренней стороны денудационной равниной. Относительная высота их достигает 500 м (гора Синюха — 887 м, уровень оз. Б. Чебацкого 305 м, оз. Шучьего 398 м). У подножия гор располагаются глубокие пресные озера, причем наибольшая глубина их приурочена к нагорному берегу

(озера Щучье, Б. и М. Чебачье); таким образом, здесь колебание высот еще больше.

Склоны гор крутые, особенно в северной, наиболее высокой части, часто обнаженные. У подножий крутых склонов нередко наблюдаются большие глыбовые развалы. По окраине гор встречаются своеобразные, характерные для гранитных массивов, обнаженные, часто заостренные сопки иногда с характерным ячеистым выветриванием (рис. 2.). К таким сопкам или останцам выветривания относится и скалистый островок «Сфинкс» на Боровом озере.

О молодости горных поднятий, как нами было уже указано ранее (1940), свидетельствуют следующие данные: 1) значительное превышение возвышенностей над равниной, обуславливающее глубокий врез сети долин и ложков и большие уклоны их русел; 2) резкая граница, очерчивающая подножье гор, и резкий перелом профиля при переходе от гор к равнине; 3) большая крутизна склонов (местами 30—35 и редко даже 40°) и значительная их обнаженность; 4) наличие пресных (еще не успевших засолониться) глубоких озер, расположенных у подножья гор, с наибольшими глубинами, приуроченными к нагорному берегу; 5) скалистый характер дна озер (например, Щучьего, по сообщению водолазов), т. е. отсутствие более или менее мощных отложений, несмотря на наличие интенсивного сноса со склонов, которые могли бы свидетельствовать о значительной древности озер; 6) отсутствие коры выветривания.

О молодых поднятиях гор Кокче-тау в дальнейшем говорит А. А. Усова, правда, не обосновывая своего мнения, а также П. Г. Корейшо.¹

Строгое совпадение возвышенности Кокче-тау с кольцевой дайкой мелкокристаллических гранитов каледонского возраста свидетельствует о приуроченности поднятий именно к дайке, к периферии купола. Анализ фаций палеозойских отложений показывает, что и в герцинское время гранитный купол испытывал поднятия, не перекрывался морями и являлся непрерывно областью сноса.

Поднятия и в последующее время определили водораздельное положение кокчетавского мелкогогорья, от которого расходятся во все стороны долины, начиная с древних долин (долина Кильчакты на северо-запад, Джаны-су на северо-восток, Атан-карасу на юго-восток).

Резкое очертание подошвы возвышенности, большое относительное превышение свидетельствуют о горстом характере поднятия. Вследствие малых размеров поднятого горста (4 × 25 км) поверхности выравнивания на нем не сохранились. Водораздел довольно узкий, а на Синюхе даже острый, зубчатый. Возвышенность имеет локальное распространение, на юге заканчивается у г. Щучинска, на севере доходит до долины р. Громотухи (соединяющей озера Боровое и Б. Чебачье). На продолжении Кокче-тау, уже в юго-восточном направлении, тянется гряда сопок на ороговикованных, контактных породах, как бы замыкая гранитное полукольцо с востока. Большая обводненность гранитов обусловила широкое развитие лесного покрова в пределах всего обнаженного купола.

Мелкосопочные нагорья² развиты значительно шире. Также изолированными островами располагаются возвышенности высотой 500—750 м. Возвышенность Зерендинская, горы Иман-тау, Аир-тау, северная часть горы Тюхты и возвышенность к северу от пос. Макинки приурочены также к гранитным массивам. Возвышенность же Якши-Янги-

¹ Устное сообщение.

² Термин предложен Н. Н. Костенко.

стау сложена порфирами, а основная часть гор Тюхты — осадочно-эффузивной толщей нижнего силура. Возвышенности Иман-тау, Зеренды и Якши-Янгистау очень напоминают по молодости поднятий и расчлененности горы Кокче-тау. Мелкосопочные нагорья также характеризуются свежестью форм эрозионного размыва, крутыми, обнаженными склонами угловатых очертаний, грубообломочными осыпями на склонах и у их подножий. Вдоль северо-восточных склонов гор Зерендинских, Якши-Янгистау, Иман-тау и Аир-тау располагаются озера, обычно сравнительно



Рис. 2. Гранитная сопка „Корова“ на берегу оз. Борового.

глубокие вблизи нагорного берега (рис. 3). Кора выветривания также отсутствует, несмотря на ее широкое развитие на окружающих денудационных равнинах. Карманы коры выветривания на северном, крутом склоне горы Якши-Янгистау, описанные Е. В. Шанцером, очевидно связаны с гидротермальными процессами.

Водораздельные части возвышенности, как правило, увенчаны скалистыми вершинами, что, видимо, является следствием наличия ограничивающих их разломов, определяющих резкое превышение и интенсивный эрозионный и денудационный сносы. Исключением является западная оконечность широтной гряды Зерендинских гор с широкими плоскими поверхностями выравнивания. Е. В. Шанцер, отметивший плосковершинность этих гор, высказал предположение, что она связана с пластовой отдельностью гранитов, которая часто образует антиклинальные перегибы. Нам кажется, что это обычная приподнятая поверхность выравнивания, сохранившаяся на данном участке от размыва.

Мелкосопочник водоразделов располагается на междуречье долин Чаглинки и Кильчакты, в верховьях р. Жабай, к югу от оз. Атансор. Склоны пологие, покрытые делювиальным покровом, как правило, лишены выходов коренных пород. Мягкие очертания склонов, обычно постепенный переход к равнинам придают явно более древний облик

этому рельефу. Как в свое время нами уже указывалось (1940) на основании наблюдений именно в Северном Казахстане, мелкосопочник представляет собой не конечную стадию разрушения горной страны (стадии, аналогичной островным горам), а результат расчленения денудационной цокольной равнины. Об этом свидетельствуют сравнительное однообразие высот сопок, связь их с устойчивыми породами безотносительно к древним водоразделам, присутствие (правда, редко) мезозойской коры выветривания на их вершинах и отсутствие ее в межсопочных долинах, а также наличие долин, разделяющих сопки, выполненных неогеновым и четвертичным аллювием. Следовательно, возникновение мелкосопочника связано с возникновением долинной сети, вызвавшей расчленение пенеплена.

Не только современные, но также и древние долины в большинстве случаев приурочены к тектоническим прогибам, депрессиям, часто очень слабо выраженным. Поэтому направления долин зачастую связаны с определенными тектоническими направлениями. Таким же образом связан с тектоническими движениями и водораздельный рельеф, но уже положительного знака. В целом ряде случаев видно, что наибольшие площади типичного мелкосопочника приурочены к осевым частям древних антиклинальных структур, что говорит об унаследованности новейшими движениями древних структурных направлений. Весьма вероятно, что за длительный период развития древней платформы многократно происходило ее обновление, причем каждый раз оказывал влияние древний структурный план. Возможно, таким образом, что мелкосопочный рельеф на некоторых участках существовал и более длительное время, но наибольшие его площади возникли в период формирования древних долин.

Для мелкосопочника весьма характерно грядовое расположение сопок, вытянутых по простиранию твердых пород. Некоторые авторы грядовый мелкосопочник, вытянутый по простиранию пород, называют «структурным» (например, для бассейна р. Колутон), в отличие от «аструктурного», приуроченного к интрузивным породам.

Нам кажется, что термин «структурный» к рельефу мелкосопочника неприменим. Как правило, указывает И. С. Шукин, структурным является денудационный рельеф на первых стадиях расчленения первичного тектонического или аккумулятивного пластового рельефа. В условиях же глубоко денудированного рельефа теряется его прямая связь с тектоническими структурами, абсолютное преобладание получают аструктурные элементы, вырабатывающиеся в условиях пород различной устойчивости.

Денудационный равнинный рельеф. Представлен цокольной и структурной равнинами. Цокольная равнина занимает основное пространство района. В центральной части она выпукло приподнята и осложнена островами молодых гор, по периферии постепенно снижается во все стороны.

Как по современному рельефу, так и по новейшей истории развития можно выделить три вида цокольной равнины: цокольная равнина (пенеплен), цокольная равнина, откопанная из-под кайнозойского плаща осадков, и цокольная равнина, перекрытая маломощным плащом кайнозойских осадков.

Цокольная равнина (пенеплен) занимает преимущественно центральную часть района, располагаясь на высотах 350—500 м. Это обширные волнистые пространства, именуемые часто «типичным казахским мелкосопочником», но, как нам кажется, являющиеся «типичной денудационной равниной». На ней часто встречаются участки водораздельных пространств, покрытые корой выветривания (каолинового типа), местами

достигающей мощности 70 м и образовавшейся в мезозое и олигоцене. На остальной территории пенепплен покрыт маломощным элювиально-делювиальным плащом суглинков с дресвой, или также очень маломощной остаточной корой выветривания, распространенной в виде небольших пятен. Характерно большое количество неглубоких соленых озер и солончаков в бессточных котловинах. Водораздельное положение равнины определило ее малую расчлененность; в силу пологих уклонов долин регрессивная эрозия рек почти не проявилась. Глинистые осадки во впадинах,

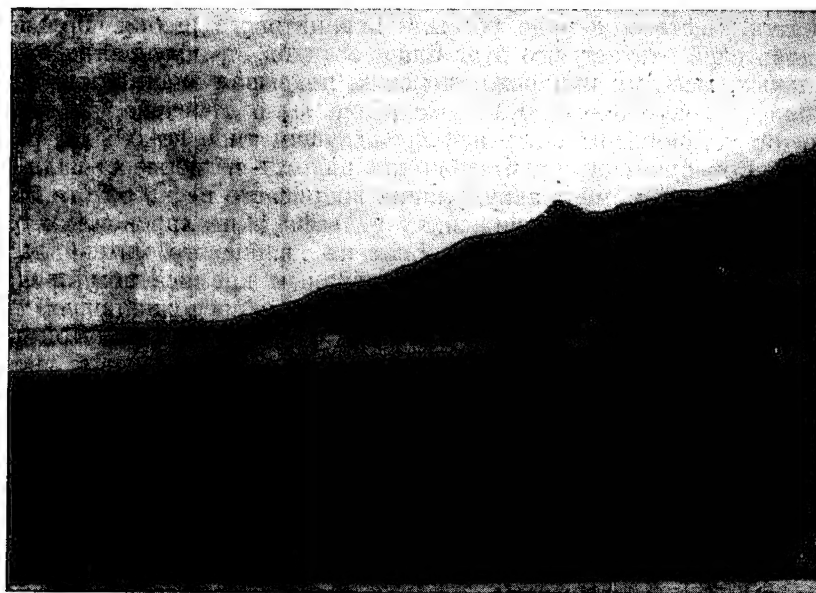


Рис. 3. Склон горы Якши-Янгистау и Якши-Янгиставское озеро.

отлагавшиеся в неогене и четвертичное время, плохо сортированы и обнаруживают тесную связь с коренными местными породами, отражая их литологический и минералогический состав. Это свидетельствует об отсутствии какого-либо значительного переноса или выноса материала за пределы района и о большом значении плоскостного смыва, приводящего к дальнейшей планации рельефа, несколько обновленный в олигоценное время. В процессе смыва коры выветривания обнаруживающийся из-под нее пенепплен приобретает более неровный, иногда холмистый, мелкопочный рельеф. Последний возникает частью за счет долинно-ложкового расчленения, частью же за счет плоскостного смыва коры выветривания и обнажения ее нижней рельефной границы. Рельефная или карманообразная ее подошва обусловлена избирательностью процессов химического выветривания, в зависимости от литологии и трещиноватости пород.

Как отмечает П. Г. Корейшо, для района верховий р. Джаны-су и горы Степняка характерно наличие редких пятен сливных кварцевых песчаников, кварцитов и крупногалечных отложений, встречающихся на пенепплене. В пределах данного рельефа эти кварциты наблюдаются довольно редко, но постепенно к востоку количество участков с ними увеличивается. Отмечается также карстовый рельеф, развитый на ордовичских известня-

ках к востоку и северо-востоку от г. Степняка и выражающийся в развитии воронок разнообразной формы и размеров. Тот же автор указывает на наличие прямолинейного уступа, имеющего явно тектоническое происхождение, прослеживающегося в широтном направлении восточнее Боровских озер.

Откопанная цокольная равнина в настоящее время имеет развитие на восточном склоне кокчетавского пенеппена (в бассейне Атансор, Коксенгир-сор, Кокпак-сор, западнее оз. Селеты). Равнина характеризуется наличием на водоразделах сравнительно частых участков развития сливных кварцевых песчаников. Они встречаются в виде изолированных пятен, местами в виде россыпи кварцитового щебня. Большинство исследователей считает, что этот плащ осадков, преимущественно континентальных, местами прибрежноморских, покрывал значительно большие пространства, чем сейчас. Как уже выше было отмечено, редкие пятна кварцитов установлены были и в предыдущем типе цокольной равнины. Но П. Г. Корейшо считает, что они там никогда не образовывали сплошного покрова, и в момент аккумуляции кварцевого песка он отлагался на отдельных участках — в понижениях рельефа в изолированных озерных бассейнах. В дальнейшем эти накопления кварцевого материала, в результате диагенеза и цементации коллоидным кремнеземом превращенные в сливные кварциты, сыграли роль брони, предохранившей поверхность пенеппена от размыва. Размывом оказалась затронутой поверхность, не защищенная кварцитово-броней. В результате возникла некоторая инверсия рельефа и понижения, выполненные кварцевыми песчаниками, заняли водораздельное положение.

Кварцевые песчаники в центральной части Кокчетавской глыбы не встречаются, так как аккумуляция происходила по ее пониженной периферии; судя по флоре, она приурочена к эоцену. Осадки имеют в основном континентальное происхождение и являются, видимо, результатом переотложения в озерах делювиально-пролювиального материала и коры выветривания.

Цокольная равнина, перекрытая маломощным плащом кайнозойских осадков, широкой полосой окаймляет цокольную равнину Кокчетавской глыбы с севера и запада. Граница между ними не всегда четкая, часто переход совершается очень постепенно. В северной же части, к западу от долины Чаглинки, граница между ними резкая. Она обозначается выпуклым склоном, переходящим в делювиальный шлейф. В месте перегиба поверхности цокольной равнины во многих случаях имеется перегиб и в продольном профиле долин, пересекающих его. Таким образом, в некоторых случаях наблюдается уступ на границе между денудационными цокольными равнинами, которые геоморфологами и геологами иногда называются «высоким и низким плато»; этому уступу Шанцер склонен приписать тектоническое происхождение. Равнина перекрыта маломощным покровом третичных осадков, в основании которых лежит кора выветривания, сохранившаяся на значительном протяжении. В основном это древняя мезозойская кора выветривания, но в некоторых случаях она имеет явно молодой, видимо олигоценый, возраст. Об этом говорит наличие ее в понижениях, разделяющих более повышенные участки, покрытые россыпями эоценовых сливных кварцитов.

Кора выветривания перекрыта третичными континентальными осадками. В основании их лежат сливные кварцевые и железистые песчаники, реже конгломераты чаграйской свиты верхнего олигоцена, переходящие

выше в пестроцветные глины наурзумской свиты; общая мощность 13 м. Еще выше лежат миоценовые осадки (видимо, аральская свита), представленные зелеными пластичными глинами до 10 м мощности. Они перекрываются свитой красно-бурых суглинков плиоценового возраста, мощностью до 12 м. Еще выше лежат уже четвертичные осадки, широко распространенные, но также маломощные. Эти осадки представлены в основном покровными суглинками, имеющими лишь в редких случаях мощность 20—25 м, чаще же она колеблется в пределах 4—7 м. Комплекс кайнозойских отложений придает ту исключительную выровненность и монотонность ландшафту, которая характерна для равнины, несмотря на ее абсолютные высоты порядка 175—350 м.

Осадки, прикрывающие пенеплен, имеют частью озерное, частью делювиальное происхождение. В наиболее глубоких ложбинах сохранились осадки потоков верхнеолигоценового времени. Плиоценовые и четвертичные отложения, представленные карбонатными, частично загипсованными суглинками, свидетельствуют о засушливом континентальном климате, который был характерен для позднейшего времени формирования рельефа. На основании же явно водных осадков, лежащих ниже, можно судить о размыве, который и обусловил врез в древний пенеплен и формирование обновленной равнины. Но общая малая глубина вреза определила полное повторение древней равнины, полную унаследованность ее первичного рельефа. Данный рельеф возник в период первых среднеолигоценовых движений и может рассматриваться, таким образом, синхронным мелкосопочному рельефу водоразделов.

Структурная равнина обрамляет цокольную равнину Кокчетавского района с севера и запада. Последняя отделяется от структурной пологим, но отчетливо выраженным уступом высотой около 20 м.

Структурная равнина формировалась в условиях опускания древнего фундамента. Судя по наличию крупных ступеней в рельефе подземной части фундамента, можно предполагать, что опускание было неравномерным, в связи с чем геологическое строение равнины различно на разных участках. Наиболее глубокие впадины в северной части заливались озерными бассейнами в юрское и меловое время. Сравнительно высоко приподнятые ступени фундамента (южнее ст. Киялы), прилежащие к цокольным равнинам, подвергались лишь нижнеолигоценовой морской трансгрессии, а в дальнейшем имел место озерно-речной режим.

Рельеф представляет собой плоскую, редко мягкоувалистую равнину. Монотонность ее нарушается очень слабо выраженными увалами, разрезающими древние ложбины вреза.

Выполнены ложбины верхнеолигоценовыми и миоценовыми (по Н. Н. Костенко) осадками, аккумуляция которых не полностью компенсировала среднеолигоценовый врез. В нижнечетвертичное время произошла аккумуляция покровных суглинков, видимо водного происхождения, которая привела к значительному выравниванию поверхности. Значительное расчленение произошло вновь в среднечетвертичное время; оно было вызвано эрозийной деятельностью мощных потоков талых вод, широко разливавшихся и блуждавших на равнинах южной Сибири.

На территории Петропавловского Приишимья сходятся две среднечетвертичные долины — Камышловский лог и долина, идущая с Павлодарского Прииртышья. Сливаясь, они образуют долину, которая пересекает современный Ишим и уходит на юго-запад, где впадает в Убоганскую долину. В настоящее время к этим среднечетвертичным долинам приурочены озерные котловины; к южной долине — Киче-карой и Чаглы, а к Ка-

мышловскому логу — сплошная цепь небольших, частью пресных, частью соленых озер, носящая название Горькой линии.

Расчленение, наиболее значительное по глубине вреза, связано уже с долиной Ишима и врезом дефляционно-соровых котловин (озер Калибек, Алабота, Киче-карой и Улькун-карой), а также многочисленных мелких котловин суффозионного происхождения.

Мелкосопочник склонов представляет собой зону эрозионного ложкового расчленения, сопровождающего долины и впадины четвертичного возраста. Впервые своеобразный рельеф придолинного расчленения (на примере р. Терс-аккан) описал Г. Е. Быков (1933), назвав его «приречным мелкосопочником». В дальнейшем, взамен термина Быкова, нами был предложен термин «мелкосопочник склонов». Этим подчеркивается связь данного рельефа не только с долинами рек, но со склонами любого происхождения. Так, аналогичный мелкосопочный рельеф возникает при расчленении склонов крупных дефляционно-соровых впадин, абразионных и тектонических уступов. Мелкосопочный рельеф характерен для склонов, расчлененных логами, в условиях складчатого субстрата с пестрым литологическим составом. В том случае, если сложение субстрата значительно более простое как по составу пород, так и по условиям их залегания, то рельеф может приобрести более простые, плавные очертания. Так, например, на склонах впадин, врезанных в третичные осадки, рельеф приобретает вид полого-холмистого. Обычно мелкосопочник располагается на уровне более низком, чем водораздельное плато. Наблюдается ясная ориентированность сопок, вытянутых в ряды в направлении простираения пород. Вдоль меридионального участка долины р. Ишим мелкосопочник склонов развит лишь по его правобережью. Ввиду малой дренированности прилегающей равнины склон левого берега расчленен сравнительно слабее. Возникновение мелкосопочника склонов связано с оживлением эрозионных процессов в конце третичного и четвертичное время. Но тектонические движения в этот период проявились не только в виде общих сводовых поднятий и опусканий, вызвавших эрозионный врез, но также и в виде дизъюнктивных дислокаций, определивших появление тектонических уступов. Местами возникли мелкогорные и мелкосопочные возвышенности, описанные выше, местами же оформились тектонические уступы, расчлененные логами и также превращенные в мелкосопочник склонов.

Долины имеют различный возраст, часто являются составными, свидетельствуя о значительных перестройках гидрографической сети на протяжении длительного времени формирования рельефа.

На основании работы Н. Г. Кассина (1936), анализирующей древние долины Центрального Казахстана, Т. М. Дембо (1941), наблюдавший древние долинообразные депрессии в Северном Казахстане, в частности в районе Степняка, пришел к выводу, что аналогичные, хорошо разработанные эрозионные долины должны быть и в Северном Казахстане. Основанием в пользу высказанного мнения, по автору, является общность условий развития рельефа в обоих районах. Интерес, который имеют долины Северного Казахстана, связан с тем, что здесь соблюдаются условия, благоприятствующие образованию и сохранению россыпей.

Необходимыми условиями, в частности для образования россыпей золота, по Т. М. Дембо, являются следующие:

1) эродированные части золоторудных месторождений должны содержать достаточное количество металла; 2) условия обогащения золотом в поверхностных зонах в течение континентального периода не должны

способствовать его рассеиванию, а должны благоприятствовать образованию более или менее крупных россыпей; 3) в какой-то отрезок времени эрозийная деятельность должна привести к образованию сколько-нибудь значительных аллювиальных россыпей; 4) образовавшиеся россыпи должны сохраниться до настоящего времени.

Первые два условия для Северного Казахстана являются благоприятными. На основании аналогии с Центральным Казахстаном и общности истории развития автор предполагает наличие здесь золотых россыпей. Отсутствие в дальнейшем эпох значительного размыва определили их сохранность, консервацию. Т. М. Дембо наметил древнюю долину с притоками, входившую в систему Ишима, с уклоном на юго-запад (рис. 4). В настоящее время долина расчленена на три участка перемычками,

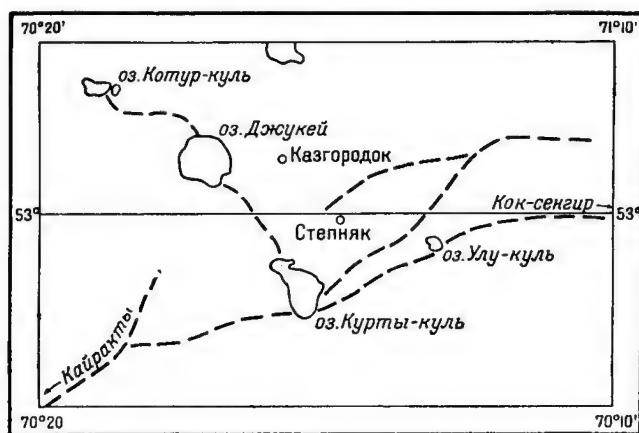


Рис. 4. Древние долины. (По Т. М. Дембо).

расположенными западнее и восточнее оз. Курту-куль. Западный участок и сейчас имеет уклон к Ишиму, средняя часть бессточная, а восточная часть приобрела обратный уклон в восточном направлении и впадает в оз. Кок-сенгир. Строение долины неизвестно, так как вскрыты осадки лишь на глубину 4—5 м. До этой глубины развиты песчано-глинистые отложения, по Дембо, — озерного происхождения. У К. В. Никифоровой (1948) есть указание на наличие на западном участке долины слабо окатанных, щебнисто-галечных пролювиальных осадков дочетвертичного возраста. Западная перемычка не вскрыта, поэтому ее сложение неизвестно, восточная же перемычка сложена красными гипсоносными глинами. П. Г. Корейшо считает, что глины имеют верхнеолигоценовый или миоценовый возраст на том основании, что к северо-востоку от Степняка (в районе оз. Айсары) аналогичные глины подстилаются морскими осадками нижнего олигоцена.

Указывается еще древняя долина с озерами Кокпак-сор, Алтай-сор, Кара-сор (к юго-юго-западу от оз. Селеты), но ее описания не дается.

Е. Д. Шлыгин намечает древние долины: вблизи Яровки, по р. Джекебулак, к западу от ст. Арыкбалыкской (долина, вероятно, связана с долиной у Яровки). Частично древняя долина используется р. Аккан-Бурлук (в ее низовьях) в направлении к оз. Калмак-куль и р. Бабык-Бурлук.

По-видимому, древней же является и долина Джаны-су, соединявшая озера боровской группы с оз. Ала-бота. Целый ряд исследователей указы-

ваает на древний возраст долины Чаглинки с притоком Кильчакты. Долины эти широкие, хорошо выражены в рельеф, во многих местах обнажаются выполняющие их красные глины. По долине р. Кильчакты (у пос. Александровского), в цоколе второй надпойменной террасы, встречены щебнисто-галечные отложения, лежащие в основании красных глин на размытой поверхности коры выветривания.

Я. Л. Фейгин (1947) по морфологическим признакам устанавливает древнюю речную сеть близ рудника Ак-бент. Древняя долина отмечается Е. В. Шанцером южнее Зерендинских гор. В настоящее время к ней приурочены озера Айдабуль, Карагайчик и Шемулды. Широкой ложбиной истоков Арчалы древняя долина связывается с долиной среднего и нижнего течения этой реки. Древняя долина выполнена глинами светло-серого цвета, плотными, не слоистыми, с раковистым изломом, по аналогии с соседними районами относимыми к миоцену. Лежат они на выветрелых палеозойских породах, перекрываются красно-бурыми глинами, аналогичными плиоценовым в других районах. В среднем же течении Арчалы отмечается даже верхнеолигоценовый возраст осадков.

Аналогичный фрагмент древней долины указан и Т. М. Микулиной. Эта долина начинается от Имантавского озера, проходит через оз. Баян и теряется в верховьях р. Н. Бурлук; о ее древнем возрасте свидетельствуют миоценовые осадки, выполняющие долину. Очевидно, древний же возраст имеет долина Колутона, достигающая ширины 20 км. В долине встречаются отдельные пятна бокситоподобных глин, а в верховьях располагается обширная депрессия, по дну которой проходит цепочка озер (оз. Канжигалы и др.).

Значительная мощность третичных осадков установлена бурением в низовьях Колутона (в его устье), у оз. Джар-куль. Здесь скважина прошла 183 м, главным образом в глинистых отложениях с небольшими песчаными прослоями, и не дошла до коренных пород. Однако эти отложения возникли, вероятно, уже не в долине, а при прогибании Тениз-Кургальджинской впадины, в которую впадал древний Колутон (северный край впадины прорезан Ишимом).

Специально древними долинами Северного Казахстана занималась К. В. Никифорова (1948). На том основании, что среди континентальных отложений мезозоя и кайнозоя, за редким исключением, развиты только глинистые породы (глинистые бокситовые фации в мезозое, глинистые гипсоносные — в третичное время), она пришла к выводу о господствовавшем озерном режиме и о практическом отсутствии рек в течение этого длительного периода. По ее мнению, речная сеть развилась только в четвертичное время, да и то вследствие малых уклонов русла довольно быстро приобрела старческий вид.

Отсутствие древней эрозионной сети привело к значительной сохранности мезозойского рельефа. К аналогичному мнению приходит Е. В. Шанцер. Приходится согласиться с данными исследователями, что на огромных пространствах в мезо-кайнозое господствовал не эрозионный размыв, а плоскостной смыв, равномерно снижавший повышенные участки и приводивший к выполнению пониженных. Материал либо аккумуляровался в замкнутых и полузамкнутых бассейнах, либо возникали обширные делювиально-пролювиальные шлейфы. О делювиальном происхождении осадков говорит их плохая сортированность, глинистость и отчетливая связь литологического и минералогического состава с местными коренными породами. Следовательно, отсутствовал значительный перенос материала и происходило его перемещение на коротких пространствах.

Как нам кажется, здесь мы имеем полную аналогию с Центральным Казахстаном. На долинный характер древних понижений указывает четвертичная долинная сеть, на многих участках использовавшая древние депрессии. Последние же почти не связаны друг с другом, возникали локально в виде неглубоких понижений и имеют явно тектоническое происхождение.

Древние долины интересовали исследователей главным образом как участки, где находятся в погребенном состоянии рассыпные месторождения полезных ископаемых. История мезозойского и третичного времени не дает основания предполагать значительную эрозионную деятельность в это время, а соответственно и наличие аллювиальных осадков, возможных коллекторов полезных ископаемых. Аллювий, который в некоторых случаях может быть встречен, так как возникающие тектонические прогибы использовались водой, будет маломощным, преимущественно местного происхождения и будет больше приближаться к типу пролювия.

Значительно большее развитие получили эрозионные процессы в четвертичное время. С этим периодом связаны настоящие эрозионные долины, часто использовавшие древние прогибы. Они хорошо выражены в рельефе, обладают несколькими комплексами аллювиальных и аллювиально-пролювиальных осадков, в большинстве случаев до сих пор имеют либо временный, либо постоянный водный поток.

Наиболее интересной является современная долина р. Ишим с ее притоками, которая является главной дренирующей артерией и обходит район с юга и запада. В верховьях это широкая (до 40—50 км, чаще 10—12 км) долина с хорошо развитыми, обширными террасами, с малым уклоном днища, что обусловило крайнюю извилистость русла. Направление долины субширотное, в начале с некоторым уклоном в направлении к северо-западу, в конце же этого широтного участка она отклоняется даже на юго-запад. Но дойдя до ур. Джар-Каин-Агач, на самой границе со структурной равниной Тургай, долина резко поворачивает на север, становится узкой (до 3 км), скалистой и идет уже в меридиональном направлении.

Со стороны Тургайской равнины, прорезанной системой долины р. Тургай и ее притоков, близко к месту поворота Ишима подходят верховья притока р. Тасты-Тургай. Геоморфологические особенности долины Ишима, а также наличие третичных осадков, встреченных на широтном участке долины, и отсутствие их на меридиональном дали основание почти всем исследователям считать долину составной и полагать, что в районе ур. Джар-Каин-Агач Ишим перехватил более древнюю долину, впадавшую в Тургайские третичные озера, а затем, еще в начале четвертичного времени, являвшуюся верховьем долины притока р. Тасты-Тургай. Но самые последние наблюдения, произведенные Е. В. Шанцером в долине Ишима, дают иное толкование истории долины. Меридионально развивавшийся Ишим вскрыл систему впадин и дренировал их. Шанцер очень внимательно обследовал водораздельное структурное плато между верховьями притоков р. Тасты-Тургай и ур. Джар-Каин-Агач и нигде не нашел хоть каких-либо следов стока Ишима в Тургай.

Не совсем понятное расположение меридионального участка долины Ишима, проходящего по границе Тургайской структурной равнины и Казахского пенепплена, но врезанного не в рыхлые осадки структурной равнины, а в палеозойские породы, объясняется Е. Д. Шлыгиным следующим образом. Казахский щит по своей западной окраине в альпийское время подвергся деформациям, имеющим субмеридиональное простира-

ние. Этому направлению подчинены: погружение палеозоя на запад, молодые улутауские структуры, грабен в низовьях Н. Бурлука, выполненный дислоцированными мезозойскими (рэт-лейасовыми) осадками. Близкое к меридиональному (северо-северо-восточное) направление имеют разломы, использованные притоками Ишима. Очевидно, в субмеридиональном направлении прошел ряд разломов или флексурных деформаций малой амплитуды, но достаточной для того, чтобы быть использованными долинами Ишима и его притоков.

Долина Ишима на широтном участке имеет значительную ширину. От г. Акмолинска до устья р. Колутон она использует окраину Тенизской впадины. На этом участке, в 20 км западнее г. Акмолинска, в Ишим впадает проток, который соединяет рр. Ишим и Нуру и по которому в некоторые годы (в половодье) Нура сбрасывает свои воды в Ишим. На этом участке р. Ишим и Нура имеют общую долину. Ее днище сложено гравийно-галечным материалом, характеризуется плоским равнинным рельефом. Местами наблюдается слабая всхолмленность, а также блюдцеобразные понижения. Нура очевидно являлась левым притоком Ишима и лишь в дальнейшем, возможно, вновь начавшееся прогибание Тенизской впадины определило ее поворот на юго-запад. В настоящее время она бифурцирует, впадает в озера тенизской группы и рядом рукава (Б. и М. Мухор, Саркрама), соединяющих старичные озера, образует русло Кос-Гоч, впадающее в Ишим восточнее пос. Джамалиевского.

В районе Акмолинска долина Ишима имеет наибольшую ширину. В ней наблюдаются следующие террасы:

Пойма 0.5—1.5 м, достигающая ширины 3—5 км, до 6—7 км в устье Колутона, с многочисленными меандрами и старицами;

I терраса высотой 3—5 м, смешанная, местами скульптурная, является общей для Нуры и Ишима, достигая в месте их соединения 40 км ширины;

II терраса высотой 12—15 м является скульптурной. Ширина ее колеблется от 2.5 до 9 км.

Надпойменные террасы плохо выражены, верхняя постепенно переходит в водораздельное плато. Наиболее отчетливо они наблюдаются обычно на правом берегу.

Западнее устья р. Терс-аккан Г. Е. Быковым (1933) устанавливается III терраса (он ее считает IV, так как счет террас ведет с поймы). Быков отмечает большую ширину террасы, завуалированной делювиальными отложениями. Е. В. Шанцер полагает, что это не речная терраса Ишима, а поверхность пенеplена, отпрепарированная действием плоскостного смыва от покрывавших ее третичных осадков. Об этом свидетельствует наличие россыпи гальки устойчивых пород на поверхности данной террасы.

Долина на меридиональном участке Ишима значительно уже, правый склон обычно крутой и скалистый, но тем не менее террасы сохраняются те же, что и на широтном его участке. Пойма имеет два уровня, причем высота высокой поймы, заливаемой раз в несколько лет, достигает 6—7 м. Русло реки почти на всем протяжении врезано в коренные породы, часто сильно порожистое. Обе надпойменные террасы эрозионные или смешанные, высота их 8—10 и 12—18 м. Выходя в пределы структурной равнины Западно-Сибирской низменности, долина местами сужается до 800—1000 м, а далее вниз расширяется и у Петропавловска уже имеет характер хорошо разработанной долины с широкими, но силь-

но сниженными террасами. Так, I надпойменная терраса имеет высоту всего 4 м, II — 10 м над урезом реки. В районе Петропавловска и у с. Марьевки в обеих террасах собрана фауна, устанавливающая их верхне-четвертичный возраст, так же как и на широтном участке долины.

Меридиональный участок долины Ишима характеризуется частым чередованием склонов скалистых и террасированных. Иногда скалистыми являются оба склона, и тогда долина принимает каньонообразный характер. Такой каньон, например, тянется на 10 км выше устья р. Иман-Бурлук.

Отмечаются также особенности взаимоотношения долины Ишима и его притоков. Так, на участках долины Ишима, имеющих направление с юго-запада на северо-восток или близкое к этому, почти всегда наблюдается у северного конца правый приток, а у южного — левый, образующие вместе с участком долины Ишима общее направление с юго-запада на северо-восток. Долина Ишима, таким образом, на меридиональном участке имеет в плане очертания ломаной, зигзагообразной линии, что, очевидно, приходится связывать с субмеридиональными разломами.

Долины притоков Ишима аналогичны долине Ишима. Наибольшее число притоков Ишим принимает справа, из них самыми крупными являются: на широтном участке Колутон (с притоками Боксук и Арчалы) и Жабай, на меридиональном — Кызыл-су, Аккан-Бурлук и Н. Бурлук. Слева в Ишим впадает только один крупный приток — Терс-аккан. Долина р. Колутон проходит почти в широтном направлении, в общем параллельно Ишиму. О ее древнем заложении свидетельствует большая ширина (до 20 км) и отдельные пятна бокситоподобных глин. Весьма вероятно, что Колутон, аналогично Ишиму, использовал тектонический прогиб, возникший в теле палеозойской платформы севернее Тенизской впадины параллельно ее краю. В настоящее время в долине наблюдается три надпойменные, эрозионно-аккумулятивные террасы верхнечетвертичного возраста. Аналогичное количество террас отмечается и в долинах притоков Колутона. Так, указывается для р. Кайракты (верховья Боксука) три террасы, причем вторая и третья являются эрозионными. Сложены террасы Колутона и его притоков в основном суглинками с линзами и прослоями песков, супесей, реже галечников. Вторая надпойменная терраса содержит остатки *Elephas primigenius*. Аналогичное строение имеют и остальные притоки правобережья. Так, в долинах Аккан-Бурлука, Шарыка и Конур-су всюду наблюдаются две надпойменные верхнечетвертичные террасы, которые в северных долинах являются аккумулятивными, а в южных, например Конур-су, становятся цокольными. Возраст их установлен неоднократно находимыми остатками мамонтовой фауны. Галечник, содержащийся в аллювии террас в виде линз и прослоев, обычно плохо окатан и плохо сортирован.

Иной характер носит долина р. Чаглинки вместе со своим крупным правым притоком — р. Кильчакты, имеющей сток на север (в оз. Чаглы). Почти на всем своем протяжении в пределах Кокчетавской глыбы долина использовала древнюю ложбину, выполненную красноцветными глинами. Это определило большую ширину четвертичной долины и ее очень малые уклоны. Долина четвертичного времени хорошо выражена в рельефе, имеет террасы, выполнена глинисто-песчаными осадками с плохо окатанной галькой. На отдельных участках долина Чаглинки, видимо, не использует древнюю долину, имеет более молодой возраст, например выше с. Корсак или в 4 км выше Володарского грейдера, где она является более суженной.

П. Г. Корейшо описывает долину Джаны-су, соединявшую озера Чебачьи Боровского района через озера Кочубай-челкар и Булат-челкар с конечно-сточным озером Алабота. Долина выполнена песчано-глинистыми осадками значительной мощности, но имеет непостоянную ширину. Эту четковидность долины Корейшо связывает с наличием небольших молодых блоков, возникших на ее пути.

Обзор долин четвертичного возраста показывает, что эрозийные процессы хотя и принимали участие в расчленении местности, но тем не менее мощность потоков была незначительна, материал не имел большого перемещения, и каких-либо крупных аллювиальных россыпей ожидать трудно. Но золотоносные россыпи типа ложковых пролювиальных и элювиальных в данном районе имеют место (Шлыгин, 1932).

Озерные котловины имеют разнообразную форму, размеры и происхождение.

По происхождению можно выделить котловины: тектонические, остаточные долинные, дефляционно-соровые, суффозионные.

Тектонические котловины в наиболее типичном виде представлены группой боровских озер. Озера располагаются вдоль обоих склонов дугообразной гряды Кокчетавских гор. По внешнему их склону находится удлиненное озеро М. Чебачье, северо-восточнее которого лежит небольшое, также вытянутое озерко Майбалык и затем самое крупное озеро Б. Чебачье. Восточнее его рассеяно большое количество небольших озерков, наиболее крупными из которых являются Теке, Ак-куль, Чебак-кала, Джайнак. Вдоль внутреннего склона вытянуто оз. Щучье и на севере находится овальное озеро Боровое. Глубины озер сравнительно большие (оз. Щучье свыше 30 м, а Б. Чебачье, у подножья горы Синюхи, свыше 40 м). Как уже указывалось выше, при рассмотрении генезиса мелкогорья гор Кокче-тау, озера имеют явно тектоническое происхождение.

О тектоническом происхождении котловины оз. Айдабуль высказывает предположение Е. В. Шанцер на основании наблюдающегося перегиба озера, вызвавшего регрессию на восточном берегу и ингрессию на северо-западном. Не совсем пока ясно происхождение таких больших, но мелких, плоскodonных озер, как Калмак-куль (к югу от р. Аккан-Бурлук), Улу-куль, Мамай и др. Оз. Улу-куль лежит на верхнеолигоценых глинах, Калмак-куль — на коре выветривания и коренных породах. Весьма вероятно, что они также возникли в результате плавных тектонических прогибаний.

К остаточным долинным озерам относятся озера типа озер Баян (расположено в древней долине западнее Имантавского озера), Булат-челкар и Кочубай-челкар (в верховьях р. Джаны-су), Джукей и Курту-куль в долине к юго-востоку от гор Кокче-тау и Копа (у г. Кокчетава).

Озера характеризуются малой глубиной, плоским дном, низкими берегами. Приурочены либо к первичным переуглубленным участкам долины, либо подпруджены делювиальными шлейфами, спускающимися со склонов, либо переуглублены дефляционными процессами. Особняком стоит группа озер, большей частью крупных размеров, располагающихся по периферии Казахского нагорья. Наиболее крупными из них являются озера: Чаглы, Калибек, Алабота, Қши-карой, Улькун-карой и Теке.

Характерной особенностью этих озерных котловин является их большая глубина вреза и бессточность. Склоны прорезаны многочисленными логами, но вследствие малой устойчивости третичных осадков, в которые врезаны котловины, они сравнительно быстро размылись и превратились в полого волнистые поверхности. Глубина вреза котловин в поверхность

структурной равнины достигает 15—30 м, а оз. Теке даже 70 м, они значительно глубже не только современных, но и древних долин. Дно котловин оз. Теке переуглублено по отношению к урезу р. Иртыша на 20 м.

Происхождение котловин еще недостаточно выяснено. Некоторые авторы предполагают, что они связаны с древней речной сетью. К. В. Никифорова утверждает их тектоническое происхождение.

Нам кажется более правдоподобным принимать их дефляционно-соровое происхождение. Против эрозионного происхождения свидетельствует резкое переуглубление котловин. Исключительно тектоническое происхождение также мало вероятно, так как днище их врезано в отложения значительно более древние, чем отложения, слагающие склоны. Тем не менее приуроченность таких крупных котловин к окраине нагорья и отсутствие их в более северных районах заставляют предполагать, что, возможно, первичное понижение, послужившее причиной образования солончака, было тектонического характера. Подобно брахи-антиклинально-горстовым поднятиям в области сводового поднятия Казахского нагорья возникли и брахи-синклинально-грабенные опускания в области погружения фундамента Западно-Сибирской платформы. Но опускания эти были малой амплитуды. Они вызвали возникновение плоских мелких впадин, в которых образовались пухлые солончаки. Последние в условиях близкого залегания грунтовых вод, свойственного синклинальным структурам, вследствие дефляционных процессов начали интенсивно углубляться. В некоторых случаях первичным углублением, послужившим причиной образования солончака, возможно, были и древние ложбины стока (например, Кши-карой). С древней долиной связано и оз. Чаглы, но, видимо, в силу высоко стоящих здесь грунтовых вод дефляционно-соровые процессы не получили широкого развития.

В настоящее время дефляционно-соровые впадины играют явно отрицательную роль, дренируя воды с большой территории и, таким образом, бесполезно ее осушая.

Большое количество мелких котловин суффозионного происхождения (биданки или бидаяки) встречается на склонах, в пределах цокольных равнин и на поверхности структурной равнины. Обычно они имеют глубину 1—3 м, диаметр от нескольких до первых десятков метров. Дно их более увлажнено, покрыто зеленой травянистой, а иногда и кустарниковой растительностью.

Большинство озерных котловин рассматриваемого района в летний период пересыхает, часть сохраняет небольшое количество соленой или горько-соленой воды и лишь небольшая часть озер полноводной является и в летний сезон и имеет пресную воду. К последним относятся большинство озер тектонического происхождения — группа боровских озер: М. и Б. Чебачье, Боровое, Щучье, Котур-куль, озера Якши-Янгиставское, Зерендинское, Айдабуль.

Многие озера имеют следы колебания уровней, выраженные наличием террас, береговых валов и широких, плоских прибрежных равнин. Озера боровской группы имеют до 5 террас, а М. Чебачье даже 6. Внешние озера (Б. и М. Чебачье и др.) имеют следующие террасы: I — 2—3 м; II — 6—7 м; III — 10—11 м; IV — 15 м; V — 25—30 м; VI — 50—55 м; причем уже II терраса является общей для всех озер, указывая на наличие единого крупного водоема, расчленение которого произошло совсем недавно. Видимо, раньше него произошло отчленение удаленного озера Джайнак, уровень которого на 9 м ниже остальных озер и которое

имеет уже ряд собственных террас. С этими же озерами соединялось и оз. Боровое, о чем свидетельствуют террасы на перешейке Булюк-тау. Не совсем ясной является самая высокая, VI терраса. Морфологически она отчетливо выражена на юго-восточном нагорном берегу оз. М. Чебачье, и примерно на этой же высоте, западнее Дорофеевки, находится плоская террасовидная поверхность, покрытая бурыми суглинками, что и заставило выделить ее как террасу. Но по общему облику эта ступень на внешнем склоне гор Кокче-тау очень напоминает прилавки хребтов Тянь-шаня, т. е. напоминает тектоническую ступень. Образована она палеозойскими породами, сравнительно расчленена и если и заливалась озером, то по самому краю, и возникновение ее с озером, может быть, не следует и связывать.

Оз. Щучье расположено особняком и видимых следов соединения его с другими озерами нет. Но соединение тем не менее, очевидно, происходило по периферии южной оконечности гор. Озеро имеет пять террас: I — 3—4 м; II — 6 м; III — 9—12 м; IV — 17 м; V — 20—21 м. I терраса почти всюду замещена песчаным береговым валом. II и III террасы также замещены валом в северной части озера. На западном нагорном берегу озера валы, наоборот, отсутствуют и террасы имеют скульптурный характер.

Верхние террасы озера (IV и V) обладают интересной особенностью. На юге они открываются в древнюю долину Кильчакты, подходящую близко к горам и озеру, и скоро теряются на внешних склонах Кокче-тау.

В настоящее время озера располагаются на разных уровнях. Б. Чебачье находится на высоте 305 м; оз. Щучье — на высоте 398, т. е. разница их уровней 93 м. Наличие высоких террас на озерах свидетельствует о их более высоких уровнях. Но озера имеют очень ограниченный водосбор и за счет его не могли получить такого количества воды. Вероятнее всего, вода попала сюда по долинам Джаны-су, выходящей из оз. Джайнак и Кильчакты, в которые открываются террасы оз. Щучьего (рис. 1). Вода в эти долины могла попасть в период широкого обводнения юга Западной Сибири (в среднечетвертичное время), когда талые ледниковые воды заполняли широкие ложбины стока. В дальнейшем произошел спад воды частично за счет осушения территории, частично же вследствие поднятий территории озер. В настоящее время уровень оз. Щучьего на 250 м выше дна ложбины стока ледниковых вод, в которой лежит оз. Чаглы и откуда поступала вода в долину Кильчакты. Сейчас питание озер поддерживается главным образом за счет трещинных вод, а водораздельное положение обеспечивает, хотя бы подземный сток, что определяет их весьма малую засоленность.

Между озерами Щучье и Боровое находится большое количество торфяников, в настоящее время уже реликтовых, подстилающихся голубовато-серой глиной. Все это — заторфовавшиеся озера, которые имели весьма широкое распространение в прошлом, возможно, именно в этот же период интенсивного обводнения.

Береговые валы отмечаются и для других озер. Так, З. И. Жильцова отмечает большой современный береговой песчаный вал на Зерендинском озере (рис. 5) и ряд (до 5) древних береговых валов. Оз. Баян (по Т. М. Микулиной) имеет абразионные террасы на высотах 1.5—2, 3—4, 5—6 м. Отмечаются также береговые валы на оз. Айдабуль, где они достигают высоты 2 м, причем иногда бывают сложными — двойными и даже тройными. Большое количество береговых валов (до 15) на озе-

рах Булат-челкар и Кочубай-челкар указывает П. Г. Корейшо. Береговые валы и террасы связаны частично с тектоническими и частично с климатическими колебаниями.

О климатических колебаниях говорят факты то полного высыхания, то наполнения озер водой. Так, для оз. Баян указывается его почти полное исчезновение в 30-х годах нашего века. Оз. Иттемень в начале столетия славилось обилием рыбы, а к 1936 г. оно уже все высохло, причем высыхание шло постепенно. В настоящее время оно вновь имеет воду.

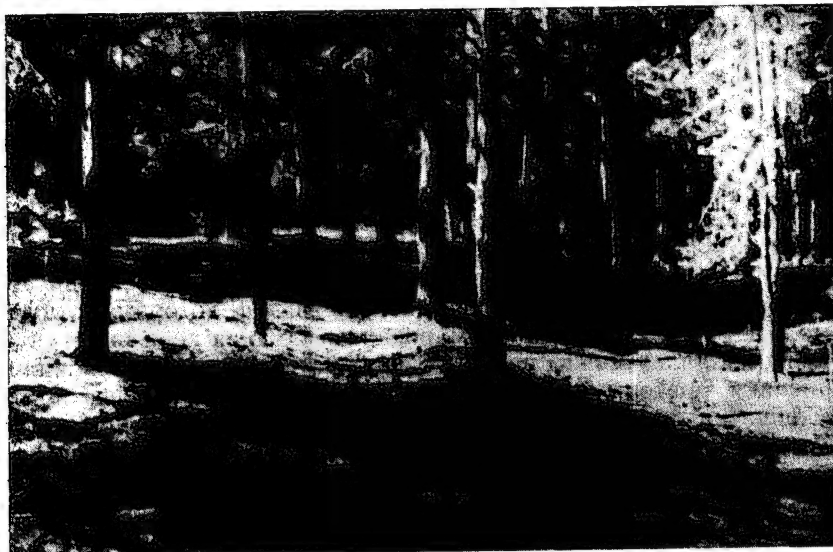


Рис. 5. Древние береговые валы Зерендинского озера.

Е. В. Шанцер указывает на наличие следов явной недавней регрессии на оз. Айдабуль, которая фиксируется ясно выраженной береговой линией озера, уже отступившего от нее, и оживлением эрозии в приустьевых частях логов.

Основные этапы истории развития рельефа

Выровненная поверхность палеозойской платформы в мезозое начала испытывать тектонические движения, определившие незначительные поднятия цокольных равнин и опускания Западно-Сибирской и Тургайской впадин. Разнородное строение Кокчетавской глыбы, включающей как допалеозойские ядра, так и нижне- и верхнепалеозойские складчатые обрамления, свидетельствует о неоднократности чередования горообразовательных эпох, вызывавших возникновение возвышенностей и, следовательно, о неоднократности эпох пенепленизации. Таким образом, пенеплен на верхнепалеозойских структурах является более молодым, верхнепалеозойско-мезозойским, а участки древних ядер, многократно испытывавших последующие движения, местами, возможно, существенно не испытывали значительных перестроек рельефа и, только несколько меняясь, устойчиво удерживали выровненную поверхность. Сохранившиеся нало-

женные мульды, выполненные этими осадками, неоспоримо свидетельствуют об одновременно возникавших аналогичных коротких антиклинальных структурах, очертания которых пока еще не ясны, так как мало-мощный покров герцинского комплекса осадков быстро оказался денудированным, а местами на антиклиналях, явно поднимавшихся в процессе седиментации, он и вовсе не отлагался. В результате брахискладчатый характер антиклинальных структур оказался замаскированным линейно-складчатым строением основных, более древних структур фундамента.

Интенсивная дислоцированность пород верхнего палеозоя, выполняющих наложенные мульды, свидетельствует о значительно напряженных движениях в это время.

В начале мезозоя вновь начались подвижки, которые в пределах Кокчетавского района вызвали возникновение впадины, вытянутой параллельно краю Тургайской впадины, в низовьях Н. Бурлука. Грубый, конгломератовый состав слоев в основании угленосной свиты и аллювиальных осадков верхней свиты, перекрывающей угленосную свиту рэт-лейасового возраста, свидетельствует о значительном уклоне потоков и, следовательно, о значительной расчлененности рельефа.

После отложения мезозойских конгломератов началось вновь выравнивание рельефа и возникновение пенеплена, на котором в условиях жаркого и влажного климата формировалась мощная кора выветривания.

В процессе дальнейшего развития рельефа периоды образования коры выветривания повторялись в верхнем олигоцене и миоцене, но вновь образовавшаяся третичная кора выветривания имела мощность меньшую, чем мезозойская. Наличие эпох корообразования в третичное время свидетельствует о том, что рельеф мало менялся и сохранял в общем равнинный облик. Тектонические движения в конце юры вызвали значительные опускания герцинской платформы в области Западной Сибири и начало мощной аккумуляции морских осадков мезо-кайнозоя. В конце среднего олигоцена и в конце плиоцена вновь происходили тектонические движения. Движения в среднем олигоцене вызвали изгибание поверхности.

В центральной части Кокчетавской глыбы произошли поднятия, в результате которых была смыта кора выветривания, периферические же части глыбы испытали некоторое опускание (северные окраины Тенизской мульды, правобережье Ишима, северная часть цокольной равнины). В опущенных частях сохранилась кора выветривания и произошла аккумуляция третичных континентальных осадков.

В центральной части поднятия имели дифференцированный характер. Опускающиеся участки также заполнялись третичными осадками, причем нижние слои их являлись более грубыми, чем верхние. Часть впадин была использована реками, возможно еще в верхнем олигоцене. Но отсутствие типичного речного аллювия и малая мощность осадков свидетельствуют о незначительности тех редких потоков, которые имели место.

В дальнейшем в некоторых случаях во впадинах образовались озера, а также продолжалось заполнение впадин делювиальными глинистыми осадками.

Тектонические движения, начавшиеся в плиоцене, достигли наибольшей интенсивности в конце плиоцена и в начале четвертичного времени. В этот период произошли поднятия и опускания в виде локальных структур, создавших участки гористого рельефа (мелкогорий, мелкосопочных нагорий и др.) и озерные глубокие впадины, ограниченные часто разло-

мами. Ограниченное распространение молодых структур до некоторой степени повторило характер таких же укороченных брахискладчатых герцинских структур. В рельефе проявились поднятия в виде куполов и опускания в виде впадин. Как показывают наблюдения, чаще всего купола приурочены к гранитным массивам (горы Кокче-тау, Иман-тау, Тюхты, Зерендинские и др.). Это послужило причиной установления мнения о том, что возвышенности имеют остаточный характер и возникли в силу крайней устойчивости разностей гранитов к процессам выветривания. Единственным объяснением данного явления нам представляется связь новейших поднятий с осевыми частями некоторых древних антиклинориев, в которых, как правило, и обнажаются гранитные ядра. Новейшие движения унаследовали ядра герцинских структур, но в Северном Казахстане, в условиях сравнительно уже жесткой каледонской платформы, сами герцинские структуры в некоторой степени унаследовали каледонские структуры. Поэтому граниты, находившиеся в ядрах обновляющихся антиклинориев, заметно приподняты.

В Северном Казахстане это — каледонские граниты. В центральном Казахстане, в осевых частях герцинских структур, герцинские граниты слагают горы (горы Еремень-тау, Эдрей, Куу, Баянаульские, Дегелен и др.), каледонские же, не обновлявшиеся гранитные массивы образуют обширные плоские пенеплены.

В пределах равнин началось эрозионное расчленение, но оно было не повсеместным. Так, в долинах рр. Бетеке и Муккур встречены пески и галечники, содержащие фауну, где преобладают обитатели больших рек с быстрым течением. На севере и западе района в это время отлагалась однообразная толща суглинков, содержащих *Elasmotherium sibiricum* (р. Кашкарбай в 30 км южнее г. Кокчетава), указывающего на нижнечетвертичный возраст суглинков. Суглинки имеют частью озерное, частью делювиально-пролювиальное происхождение и достигают наибольшей мощности на левобережье Ишима (20—25 м). В среднечетвертичное время продолжается развитие речной сети, возникшей еще в нижнечетвертичное время, а также закладывается новая сеть, приуроченная главным образом к окраинам структурных плато. Потоки широко разливались, стекая из района Прииртышья в Тургайскую низменность, а также размывали структурное плато по левобережью Ишима, образуя степные пониженные плато. Весьма возможно, что потоки использовали направления, определившиеся слабыми тектоническими движениями в это время. В момент интенсивного обводнения юга Западно-Сибирской и Тургайской низменностей вода проникла по древним долинам Кильчакты и Джаны-су также и в пределы Казахского нагорья, в горы Кокче-тау.

В центральной части междуречных пространств продолжалось формирование водораздельных покровных суглинков и переотложение более древних суглинков, сносимых в пониженные пространства. О среднечетвертичном возрасте верхней части покровных суглинков свидетельствуют находки *Elephas trogontherii*. Таким образом, процесс образования обширных, мощных делювиально-пролювиальных шлейфов покровных суглинков, начавшийся еще в плиоцен-нижнечетвертичное время, продолжался и в среднечетвертичную эпоху, приводя к выравниванию поверхности и заполнению долин и впадин. К этому же времени относятся и образование некоторых озер. Так, Д. С. Кизевальтер и другие считают, что многие озера района возникли при перегораживании древних долин конусами выноса делювиально-пролювиального происхождения. Некоторые из них, например оз. Имантауское, в результате дополнительного

подпруживания суглинками даже испытало некоторое повышение уровня (на 8—11 м выше современного).

Наличие двух надпойменных террас в долинах свидетельствует о двух-цикловом развитии долин, свойственном всему району. Обе террасы характеризуются мамонтовой фауной, устанавливающей их верхнечетвертичный возраст. Четвертичные осадки представлены в основном мощной толщей карбонатных и частично загипсованных суглинков, указывающих на преобладающий засушливый режим. Отсутствие широко разветвленной речной сети почти до верхнечетвертичного времени определило накопление мощных толщ делювиально-пролювиального материала. Тесная связь литологического и минералогического состава четвертичных осадков с более древними местными породами, плохая окатанность и сортированность материала подтверждают незначительность перестройки рельефа цокольных равнин, которая имела место на протяжении с неогена, несмотря на явное оживление эрозионных процессов в четвертичное время. Климатические колебания в четвертичное время выражались, таким образом, в некотором обводнении и иссушении территории, а также в похолодании и потеплении климата.

При изучении торфяников в районе озер боровской группы было установлено, что внизу преобладает береза, редко встречаются пихта, ель, кедр, вяз и лиственница. В верхней части торфяников резко преобладает сосна. В настоящее время наблюдаются периодические изменения климата, определяющие усиление и ослабление эрозионных процессов и колебания уровня воды в озерах.

Врезание речной сети продолжается и в настоящее время; об этом свидетельствуют рост и углубление ложковой сети, расчленяющей склоны долин, наличие порожиности некоторых рек, что является результатом продолжающегося воздымания Кокчетавской глыбы.

Как видно из палеогеографического обзора, в описываемом районе, начиная с мезозоя, речная сеть не имела широкого развития, что обусловило и значительную консервацию рельефа.

Анализ истории развития рельефа (рис. 6) отчетливо показывает наличие нескольких этапов рельефообразования, когда направленность процессов денудации резко менялась, и причины этих изменений определялись главным образом тектоническими, а также и климатическими колебаниями. Можно наметить четыре основных этапа рельефообразования.

Досреднеолигоценовый, или мезозойско-нижнепалеогеновый, этап — период общей планации поверхности, когда имело место явное превосходство денудационных процессов над весьма слабо проявлявшимися тектоническими движениями. Непрерывно возобновлялся рельеф денудационной цокольной равнины и формировалась кора выветривания. Развитие обширного морского эоценового бассейна по ее периферии не нарушило равнинности рельефа.

Среднеолигоцен-плиоценовый этап начался с конца среднего олигоцена и был вызван первыми, более или менее значительными движениями, вызвавшими некоторую переработку рельефа, сохранившуюся до сих пор. Произошли плавные поднятия и опускания денудационной равнины. В областях опусканий поверх коры выветривания отложился маломощный покров кайнозойских осадков. В областях поднятий пенеплен, напротив, стал очищаться от покрова коры выветривания, заложилась древние долины, большей частью приуроченные к слабо прогнутым впадинам; расчленение водоразделов в местах наибольших поднятий привело к образованию водораздельного мелкосопочника.

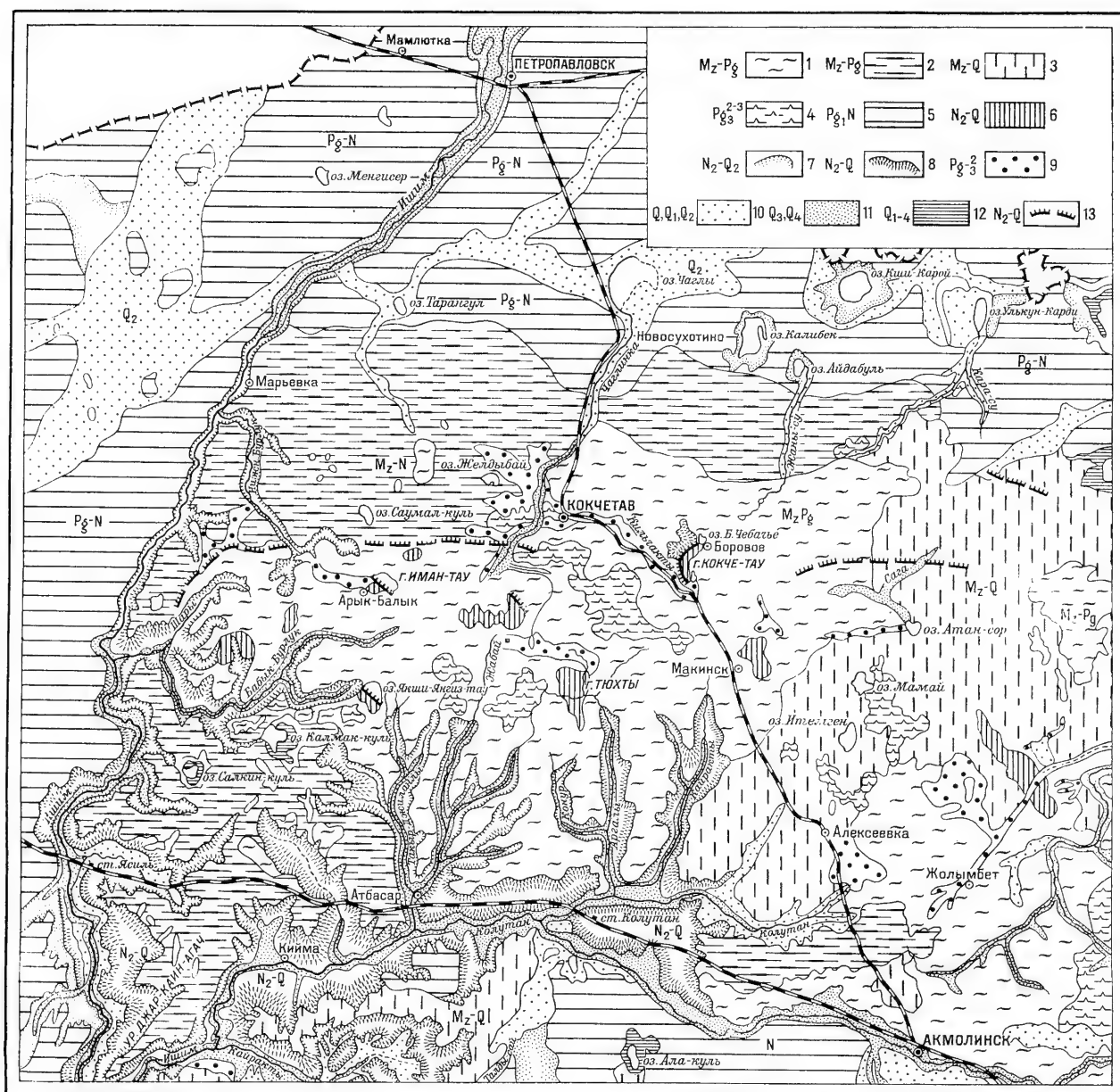


Рис. 6. Геоморфологическая карта Северного Казахстана. Масштаб 1 : 2 000 000.

1 — покатая равнина (песчаная) местами с сохранившимся корой выветривания; 2 — покатая равнина (песчаная), опущенная в платформенных пределах; 3 — покатая равнина (песчаная), опущенная в платформенных пределах; 4 — низкотеррасная равнина на третичных породах; 5 — структурная покатая равнина на третичных породах; 6 — низкотеррасная, мелкотеррасная и холмистая; 7 — холмистая и столбово-столбовый рельеф склонов на третичных породах; 8 — мелкосопочник склонов разрыва покатой равнины; 9 — дна древних долин и впадины, заполненные третичными осадками; 10 — речные террасы и дна четвертичных долин; 11 — поймы, местами поймы и неровная терраса; 12 — древняя озерная равнина; 13 — тектонический уступ.

Верхнеплиоцен-нижнечетвертичный этап вызван был повторными, но уже более интенсивными тектоническими движениями. Возникли возвышенности и впадины; местами пластичные изгибы деформировавшейся поверхности сопровождались ее растрескиванием, возникли разломы, стала перестраиваться гидрографическая сеть.

Четвертичный этап охватывает четвертичный период. Наряду с продолжающимися тектоническими движениями большое значение приобретают климатические колебания, вызванные сменой влажных и засушливых эпох. Окончательно оформилась гидрографическая сеть.

Климатические колебания продолжаются и в настоящее время, выражаясь в колебаниях уровней озер. Особенно резко проявляются колебания с периодом 11—12 лет.

Литература

- Берг Л. С. (1953). О проблематичности усыхания степей и пустынь. Изв. АН СССР, Геогр., 5.— Берг Л. С. и П. Г. Игнатов. (1901). Соленые озера Селеты-тениз, Теке и Кызыл-кан Омского уезда. Зап. Сиб. отд. Русск. геогр. общ., 28.— Быков Г. Е. (1933). Рельеф и водоемы бассейна реки Терсак-кан в Казахстане. Изв. ВГО, 5.— Василенко В. К. (1951). Каройская тектоническая линия Западной Сибири. ДАН СССР, XXVI, № 6.— Великовская Е. М. (1941). Бокситы Северо-Восточного Казахстана. Бокситы, т. I, ч. 2, Тр. ВИМС, вып. III.— Геология СССР, т. XX. Восточный Казахстан. (1941).— Герасимов И. П. (1943). Современные проблемы геоморфологии Казахстана. Алма-Ата.— Дембо Т. М. (1941). О погребенных россыпях в Степняковском районе Северного Казахстана. Сов. Геология, 4.— Казахстан. Общая физико-географическая характеристика (1950).— Кассин Н. Г. (1936). О древних долинах в Центральном Казахстане. Пробл. сов. геологии, 1.— Кассин Н. Г. (1937). Новые данные о строении Западно-Сибирской низменности. Тургайской и Иртышской впадин. Пробл. сов. геологии, 7.— Кассин Н. Г. (1947). Материалы по палеогеологии Казахстана. Изд. АН КазССР.— Кассин Н. Г. (1951). Развитие геологических структур Казахстана. Изв. АН КазССР, геол., 14 (114).— Кассин Н. Г. (1952). Развитие геологических структур Казахстана. Изв. АН КазССР, геол., 15 (119).— Квятковский Р. Э. (1943). Геологическое строение Селеты-Степняковского района. Матер. по геол. и полезн. ископ. Казахстана, вып. 23, Алма-Ата.— Лавров В. В. (1953). Краткий обзор континентальных третичных формаций Тургай и юга Западной Сибири. Вестн. АН КазССР 6 (99).— Левина З. Т. (1953). О строении одной из древних долин Центрального Казахстана и возрасте заполняющих ее отложений. Вестн. АН КазССР, 11.— Никифорова К. В. (1948). К вопросу о древних долинах в Северном Казахстане (Степняковский и Акмолинский районы). Бюлл. Ком. по изуч. четверт. периода, 13.— Очерки по физической географии Казахстана. (1952). Изд. АН СССР.— Пошка А. И. (1950). Находка костей мамонта в Северном Казахстане. Природа, 11.— Сваричевская З. А. (1940). Проблема мелкосопочника. Изв. ВГО, 2.— Фейгин Я. Л. (1947). О возможности нахождения аллювиальных россыпей золота в Северо-Восточном Казахстане. Сб. матер. по геол. золота и платины.— Шатский Н. С. (1951). Мезо-кайнозойская тектоника Центрального Казахстана и Западно-Сибирской низменности (к вопросу о явлениях унаследования в развитии платформ). Сб. памяти акад. А. Д. Архангельского, изд. АН СССР.— Шлыгин Е. Д. (1932а). Геологическое строение восточной части Северного Казахстана (район к западу от оз. Селенты-денгиз). Изв. ВГО, 67.— Шлыгин Е. Д. (1932б). Перспективы золотых россыпей Кокчетавского района и задачи поисковых работ на жильное золото. Изв. ВГО, 59.— Шлыгин Е. Д. (1936). Кора выветривания Северо-Восточного Казахстана. Пробл. сов. геологии, 10.— Шлыгин Е. Д., Д. Н. Казанли, В. В. Лавров. (1952). Параллелизация третичных толщ равнинных и горных областей Казахстана. Вест. АН КазССР, 8.— Щуккин И. С. (1946). Опыт генетической классификации рельефа. Сб. «Вопросы географии», 1.— Яншин А. Л. (1953). Геология Северного Приаралья. (Стратиграфия и история геологического развития). Тр. МОИП.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . Х
Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К О Е О Б Щ Е С Т В О С О Ю З А С С Р

К. И. ГЕРЕНЧУК

**К ВОПРОСУ О РОЛИ ТЕКТОНИЧЕСКОГО ФАКТОРА В РАЗВИТИИ
ОРОГРАФИИ РУССКОЙ РАВНИНЫ**

Последние 10—15 лет ознаменовались широким развитием работ по исследованию глубинной геологии Русской платформы. Эти исследования, опирающиеся главным образом на глубокое бурение, а также геофизические работы, дали исключительные по своей важности результаты. С одной стороны, они открыли новые нефтеносные районы, а с другой, они обогатили геологию новыми данными, которые позволяют глубже познать закономерности тектонического строения и развития Русской платформы.

Раскрытию этих закономерностей посвящены многочисленные работы, среди которых необходимо прежде всего назвать исследования А. Д. Архангельского (Архангельский и др., 1937; Архангельский, 1947), Н. С. Шатского (1946, 1948), В. В. Белоусова (1944, 1954) и ряда других авторов (Бакиров, 1954; Пистрак, 1950; Ронов, 1949; Хаин, 1951).

Нет необходимости доказывать, что установленные в этих работах закономерности строения и развития Русской платформы далеко выходят за региональные рамки Восточной Европы и имеют принципиальное значение для познания общих законов развития земной коры.

Результаты современных геологических исследований выходят также за рамки собственно геотектоники и имеют первостепенное значение для ряда смежных наук и прежде всего геоморфологии.

Развитие геоморфологических исследований за последние 50—60 лет шло под преимущественным влиянием идей В. В. Докучаева (1878) и особенно В. М. Дэвиса (Davis, 1924), которые главную роль в формировании рельефа отводили экзогенным процессам и прежде всего речной эрозии и аккумуляции.

В известной триаде Дэвиса «структура-процесс-стадия» активная роль признавалась только за «процессом», т. е. действующим в данном месте фактором — эрозией речной или ледниковой, эоловой и т. п. «Структура» рассматривалась Дэвисом как пассивное тело, влияющее на рельеф своими литологическими свойствами, слоистостью, условиями залегания и т. д. Раз поднявшись в виде массива, суша затем терпеливо испытывала воздействие внешних процессов, которые ее расчленили, денудировали и в конце концов низводили до стадии пенеплена.

На это слабое место концепции Дэвиса указывали многие исследователи (Эдельштейн, 1947; Марков, 1948, и др.), и хотя ее влияние среди советских геоморфологов ослабело, но все же остается еще сильным.

Широко известная работа В. Пенка (Penck, 1924) способствовала признанию важнейшей роли тектонических движений в формировании

рельефа горных стран, однако в отношении равнин, и в частности Русской равнины, она не оказала существенного воздействия на познание их геоморфологии.

Необходимо, однако, отметить, что целый ряд геоморфологов нашей страны указывал на важную роль тектонических движений в развитии рельефа равнин. Среди них мы назовем И. П. Герасимова, который в ряде работ (1946, 1948) отстаивает точку зрения об определяющем влиянии тектоники на формирование орографии Русской равнины.

К. К. Марков (1948) выдвинул как важные проблемы геоморфологии изучение направленности, унаследованности и цикличности в развитии рельефа, иллюстрируя свои мысли примерами из Русской равнины.

Большое внимание закономерностям формирования орографии Русской равнины уделил Н. И. Николаев (1949) в своей работе по новейшей тектонике СССР, в которой на многочисленных примерах было показано, во-первых, существование новейших тектонических движений, имеющих более или менее заметное выражение в рельефе, и, во-вторых, подчеркнуто, что эти движения имеют дифференцированный характер и унаследованы от тектонических структур различного типа и возраста.

Я. Д. Зеккель в ряде работ (1945, 1948, 1953) показал зависимость направлений многих рек Русской равнины и существенных черт ее орографии от распределения тектонических структур, подчеркнув при этом важную роль изучения плана орогидрографии для познания тектонического строения равнины.

Определенный шаг вперед в деле познания закономерностей формирования орографии равнин представляют работы Ю. А. Мещерякова (1951 а, 1951 б), в которых он предложил разделение Русской равнины на зоны по степени и характеру проявления тектонических структур в рельефе.

Несколько работ, посвященных анализу тектонической обусловленности современной орогидрографии Русской равнины как в целом, так и отдельных ее регионов, опубликовал автор настоящей статьи (1950 а, 1950 б, 1953).

Все же, несмотря на определенные сдвиги в разработке проблемы влияния тектоники на формирование основных черт орографии и плана гидрографии, приходится признать, что многие из выдвинутых по этому вопросу положений носят слишком общий, нередко почти декларативный характер и не соответствуют современной степени изученности тектоники Русской равнины. Известно, что наряду с прямыми соотношениями тектонических структур и орографии, когда антиклинальным структурам соответствуют возвышенности, а синклиналим — низменности, имеются многочисленные примеры обратных и более сложных соотношений, что вызывает определенные сомнения в справедливости положения об определяющей роли тектоники в формировании орографии Русской равнины.

Вот почему мы считаем, что назрела настоятельная необходимость более детального рассмотрения вопроса о тектонических закономерностях формирования орографии и гидрографии Русской равнины. Настоящая статья представляет собой попытку более детального анализа этого сложного комплекса вопросов.

Главнейшие представления о структуре Русской платформы и закономерностях ее тектонического развития, имеющие существенно важное значение для понимания происхождения и истории развития ее поверхности, сводятся к следующим:

3 Географический сборник, вып. X.

1. Русская платформа характеризуется двухъярусным строением: нижний ярус представляет собой сильно дислоцированные и метаморфизованные породы, преимущественно докембрийского возраста, которые составляют фундамент платформы; верхний ярус представлен толщей осадочных пород, залегающих почти горизонтально и лишь местами нарушенных более резкими дислокациями.

2. Русская платформа обладает определенной структурной дифференциацией как складчатого фундамента, так и осадочного покрова, что выражается в наличии структур различных классов и соподчинений (щиты, выступы, погребенные своды, антеклизы, синеклизы, прогибы, валы, купола, флексуры и т. п.), которые сформировались в процессе геотектонического развития платформы и различаются не только строением, но и возрастом, подвижностью и значением в истории развития платформы.

3. История геотектонического развития Русской платформы есть история волнообразно колебательных движений земной коры, в ходе которых устанавливается достаточно отчетливая периодичность. Весь комплекс движений, начиная с кембрия, распадается на три этапа (цикла), каждый из которых начинается прогибаниями платформы и развитием трансгрессий и заканчивается поднятием и осушением ее. Эти этапы (циклы) получили название каледонского (нижнепалеозойского), герцинского (верхнепалеозойского) и альпийского (мезо-кайнозойского).

4. История геотектонического развития Русской платформы, история ее колебательных движений, тесно сопряжена с историей развития обрамляющих ее геосинклиналей. Так, каледонский этап сопряжен с развитием геосинклинали в Скандинавии, что доказывается максимальным развитием кембро-силурийских отложений на северо-западе платформы; герцинский этап связан с развитием Уральской геосинклинали, что находит свое подтверждение в максимальном развитии пермо-карбоновых отложений на востоке и в центре платформы; альпийский этап тесно сопряжен с развитием Кавказско-Карпатской геосинклинальной области, что доказывается максимальными мощностями мезо-кайнозойских отложений на юге Русской платформы. В каждом геотектоническом этапе наиболее подвижны те части платформы, которые располагаются по соседству с развивающейся на данном этапе геосинклинальной областью.

5. История геотектонического развития Русской платформы представляет собой процесс ее структурного усложнения, в котором наряду с новообразованными на данном этапе структурами сохраняются некоторые существенные черты структур предыдущего этапа. Каждый новый этап развивается на основе предыдущего, наследуя его основные структурные взаимоотношения, которые в ходе волнообразно колебательных движений данного этапа видоизменяются, приобретают новые качественные особенности.

Таким образом, геотектоническое развитие платформы характеризуется определенной направленностью, которая выражается в унаследовании существенных черт структуры предыдущего геотектонического этапа и ясно выраженной изменчивостью, заключающейся в усложнении старых структур и появлении новых вследствие качественного своеобразия колебательных движений на новом этапе.

Перечисленные здесь общие положения, характеризующие важнейшие закономерности геотектонического развития Русской платформы, мы рассматриваем как исходные для выяснения роли тектонических структур в истории развития поверхности Русской равнины. Анализ этого вопроса

мы начнем с сопоставления современной орографии Русской равнины с рельефом докембрийского фундамента, исходя из вполне допустимого предположения, что современная орография равнины и рельеф кристаллического фундамента отражают суммарный результат как всех тектонических движений земной коры, так и действия денудационных процессов, начиная, по меньшей мере, с кембрия.

Особенности орогидрографического плана Русской равнины

Внимательный обзор гипсометрической карты Русской равнины позволяет заметить многие весьма существенные различия в плане ее орографии и речной сети. Прежде всего обращает на себя внимание южная половина равнины, представленная закономерно расположенными низменностями и возвышенностями.

Здесь имеется широкая полоса низменностей, протягивающихся от дельты Дуная до Эмбы. Она то расширяется на сотни километров (Причерноморская, Азово-Кубанская, Прикаспийская), то переходит в узкие перемычки (Приазовская и Манычская низменности), но все же выдерживает свое основное, широтное простираие. Обращают на себя внимание исключительно простые, прямолинейные или овальные контуры этих низменностей. Только одна возвышенность — Ставропольская — вклинивается в эту полосу приморских низменностей, но она непосредственно прилегает к Кавказу, подчеркивая этим свое некое родство с последним.

В южной половине Русской равнины имеется чрезвычайно любопытная полоса возвышенностей и низменностей, протягивающихся от Карпат до Урала. Любопытной чертой этой полосы является то, что возвышенности и низменности правильно чередуются, обладая при этом закономерно выдержанными простираиями. Возвышенности западной части: Прикарпатская, Бессарабская, Воыно-Подольская, Приднепровская, Донецкий кряж, и Приднепровская низменность обладают согласными северо-западными простираиями, такими же, как Карпаты и Кавказ.

В восточной части этой полосы начинают преобладать меридиональные простираия орографических элементов. Такими простираиями обладает Средне-Русская и Приволжская возвышенности, Окско-Донская низменность и Низменное Заволжье, подчеркивая этим некую связь с простираием Урала.

Однако орографические простираия восточной части равнины меридиональными направлениями не исчерпываются; здесь сохраняются частично и северо-западные простираия, которым следует Бугульминско-Белебеевская возвышенность; здесь наблюдаются и широтные простираия, характерные для Общего Сырта. Одним словом, восточная часть равнины обладает сложным планом, в котором как бы перекрещиваются кавказско-карпатские и уральские простираия, усложненные к тому же широтными линиями, характерными для Прикаспийской низменности.

Отмеченная группировка орографических линий резко подчеркивается направлениями главных рек этой полосы равнины. На западе они северо-западные (Днестр, Ю. Буг, Днепр, С. Донец); далее к востоку реки начинают приобретать меридиональные направления, которые уже заметны у Дона, еще резче у Цны с Мокшей, у Суры, у Волги между Казанью и Сталинградом, а также у рр. Белой и Ик. Однако на востоке имеются и широтные направления рек, как у Урала (между Оренбургом и Уральском), и северо-западные, как у Самары, Зая и Шешмы.

Наконец, еще одна черта характерна для орографии южной половины Русской равнины: обширные размеры и относительная простота контуров возвышенностей и низменностей. Каждая из возвышенностей как бы насажена на единый обширный приподнятый цоколь, обуславливая определенное орографическое единство данной возвышенности.

Северная половина Русской равнины обладает специфическими чертами орографии. Наиболее своеобразная черта заключается в островном характере возвышенностей, то собранных как бы в гирлянды, то разбросанных в одиночку по обширным пространствам низменностей и равнин. Особенно типично развита эта «островная» орография в Прибалтике, но она достаточно хорошо выражена также и на беломорском севере и в центре Русской равнины.

Всматриваясь в это, на первый взгляд, хаотическое устройство поверхности, нельзя не заметить наличия определенных направлений орографических и гидрографических линий. Прежде всего обращают на себя внимание северо-западные простирания, которым подчиняются Тиманский кряж, Канин Камень, также Мурманский берег Кольского полуострова. Этому же простиранию подчиняются Северная Двина со своей обширнейшей низменностью и р. Мезень с Вашкой, и р. Онега, а также заливы Белого моря — Канда拉克шская, Онежская и Двинская губы, и Онежский полуостров. Такое же направление сохраняют на значительном протяжении рр. Вятка, Ветлуга и Волга от Щербакова до Горького.

Вторым примечательным направлением орогидрографических линий северной половины Русской равнины является северо-восточное, которого придерживаются многие возвышенности: Белорусская, Смоленско-Московская и ее продолжение — Клиско-Дмитровская, а также гряды Галичская, Угличская и Валдайская. Северо-восточному направлению следуют также рр. Сухона, Вычегда и Волга (от Зубцова до Щербакова). Любопытно отметить, что в западной части равнины эти северо-восточные направления постепенно переходят в широтные, которыми характеризуются Полесская низменность с Припятью, Литовская озерная гряда, р. Западная Двина и Финский залив.

Для западной части равнины, в особенности Прибалтики, не менее типичны также и меридиональные направления, которым следует Рижский залив, понижение, занятое озерами Псковским и Чудским и рр. Ветликой и Нарвой; меридиональное направление сохраняют долины Ловати и Волхова.

Весьма характерны меридиональные простирания для восточной, приуральской, части равнины. Такое направление имеют Вятские увалы, Верхнекамская возвышенность, на значительном протяжении рр. Кама и Печора и ряд других рек.

Весьма распространенной чертой орографии Русской равнины является асимметрия склонов, выражающаяся в том, что часто наблюдается один склон крутой, в виде уступа, а противоположный представлен пологим скатом. Особенно резко эта черта выражена у многих возвышенностей южной половины равнины, на что обращали внимание Д. Н. Анучин (1895), Г. И. Танфильев (1922), А. А. Борзов (1948), а еще раньше К. М. Бэр (1856).

Однако следует отметить, что асимметрия склонов распространена также и у возвышенностей северной половины Русской равнины. Наличие односторонних уступов известно на Валдайской возвышенности, Силурийском плато, Эстонской возвышенности (Пандивере), Лужской,

Курземской, Клинско-Дмитровской, Коношско-Няндомской, Лепшинской, Беломорско-Кулойской и других возвышенностях Прибалтики, центра и севера Русской равнины.

Подводя итоги рассмотрению плана орогидрографии Русской равнины, мы можем отметить наличие в нем таких основных направлений (рис. 1):

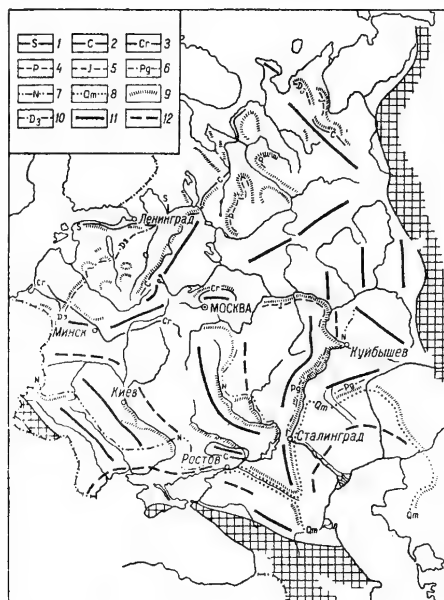


Рис. 1. Направление орогидрографических линий и границы стратиграфических комплексов Русской равнины.

1—граница силура, 2—граница карбона, 3—граница мела, 4—граница перми, 5—граница юры, 6—граница палеогена, 7—граница неогена, 8—граница морских четвертичных отложений, 9—орографические уступы, 10—граница верхнего девона, 11—простирания возвышенностей, 12—простирания низменностей.

- 1) северо-западного, особенно характерного для юго-западной и беломорской частей равнины; подчиненное значение это направление имеет на востоке;
- 2) меридионального, весьма характерного для восточной, приуральной части равнины, а также для Прибалтики;
- 3) северо-восточного широко распространенного в бассейне верхней Волги и Сухоны с Вычегдой;
- 4) широтного, наиболее типичного для южной приморской полосы низменностей, а также для западной части равнины и Прибалтики.

Трудно допустить, чтобы эти, выдерживающиеся направления орографических элементов и рек Русской равнины были случайными. Вернее будет предположение, что орогидрографический план Русской равнины определен какими-то условиями, причины которых вероятнее всего искать в особенностях тектонической структуры Русской платформы; поэтому мы перейдем к рассмотрению структурного плана ее.

Основные черты структурно-тектонического плана Русской платформы

Согласно современным данным, Русская платформа представляется глубоко дифференцированной на структурные элементы различного строения, величины, возраста и значения в истории развития платформы. Эта структурная дифференциация охватывает не только осадочный чехол платформы, но и ее кристаллический фундамент, который вследствие этого обладает неровностями больших амплитуд, образующими сложный, глубоко расчлененный рельеф.

Новейшая сводка основных (региональных) тектонических структур дана в «Тектонической карте СССР», изданной в 1953 г. под редакцией Н. С. Шатского. История развития этих структур изложена в работах Н. С. Шатского (1945, 1946), Р. М. Пистрак (1950), М. В. Муратова (1949), А. А. Бакирова (1954), Г. Х. Дикенштейна (1953) и ряда других авторов.

Данные о рельефе кристаллического фундамента можно найти в работах Э. Э. Фотиади (1947), Б. Б. Митгарц и М. М. Толстихиной (1952), А. А. Трофимука (1950) и ряде других работ.

Хотя классификация тектонических структур платформы была начата уже в работах А. П. Карпинского (1894, 1919) и А. П. Павлова и дальше разрабатывалась А. Д. Архангельским (1934) и Н. С. Шатским (1946), однако за последние годы добыто много новых фактов сложных и разнообразных структурных соотношений Русской платформы, не укладывавшихся в предложенные схемы.

Отметим важнейшие региональные структуры Русской платформы (рис. 2).

Области поднятий фундамента. Щиты, представляющие собой поднятия крупных массивов кристаллического фундамента, выведенных на дневную поверхность. Существенными чертами щитов являются: максимальная устойчивость в течение нескольких геологических эр, минимальные амплитуды и скорости колебательных движений, обладающих преобладающей тенденцией к поднятиям.

Балтийский щит (рис. 2, I) обладает очень сложной системой дислокаций, однако господствующие простирания его складчатого комплекса — северо-западные; такими же преимущественно северо-западными простираниями отличаются и более поздние разломы как внутри щита, так и ограничивающие его контуры, особенно на севере. Разломы, ограничивающие его с юга, имеют широтные простирания, а с востока — северо-восточные и меридиональные.

Украинский щит (рис. 2, II) тоже отличается очень сложной системой докембрийской складчатости, имеющей меридиональные и северо-западные простирания. Разломами в конце докембрийской эры и в последующие геотектонические эпохи Украинскому щиту были приданы современные очертания; простирания главных разломов: северо-западные (по границе с Днепровско-Донецкой впадиной), меридиональные (по границе с Припятской впадиной).

Выступы фундамента представляют собой поднятия крупных массивов складчатого кристаллического фундамента, на которых осадочный чехол не превышает 500 м мощности. Геотектонический режим выступов характеризуется чередованием восходящих и нисходящих дви-

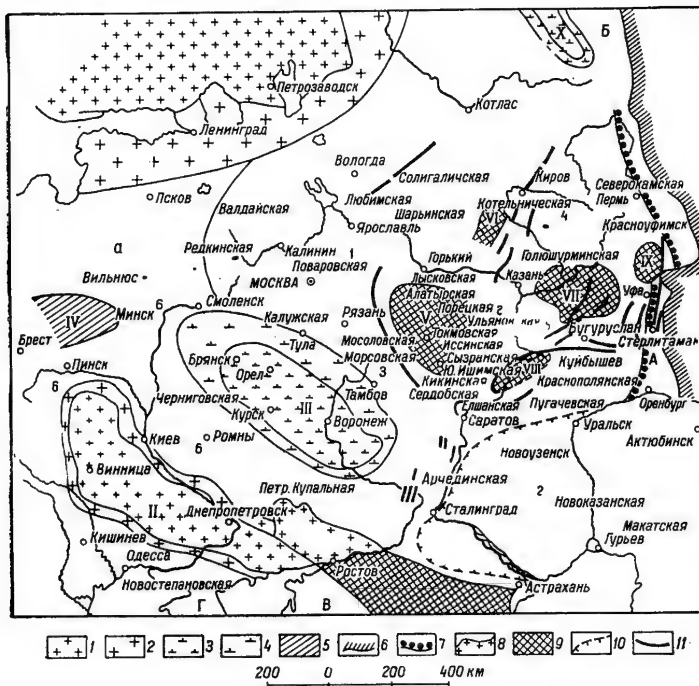


Рис. 2. Схема основных тектонических элементов кристаллического фундамента Русской платформы. (По А. А. Бакирову).

Легенда карты: 1—щиты, 2—склоны щитов, 3—выступы, 4—склоны выступов, 5—погребенные своды, 6—внешняя граница распространения герцинских складчатых сооружений Урала, 7—граница Предуральского прогиба, 8—внешняя граница донецкого герцинского складчатого сооружения, 9—область погребенного герцинского складчатого сооружения, 10—внешняя граница распространения соляной тектоники, 11—зоны валоподобных поднятий в осадочном комплексе. Предгорные краевые прогибы: А—Предуральский, Б—Печорский, В—Азово-Кубанский, Г—Причерноморский. Волгодонская, Редкинская и т. д. — структурные свдвиги. Цифровые (римские и арабские) и буквенные обозначения на карте оговорены в тексте.

жений с преобладанием первых; поэтому осадочный чехол здесь небольшой мощности; для него типично отсутствие ряда ярусов, отделов, а иногда и целых систем.

Воронежский выступ (рис. 2, III) — сложная система докембрийской складчатости, имеет преобладающее северо-западное простираение; в том же направлении ориентированы контуры массива.

Белорусский выступ (рис. 2, IV) кристаллического фундамента, как и Воронежский, в наиболее приподнятой части поднимается выше уровня моря. Выступ имеет асимметричное строение: юго-восточный склон его круче северо-западного, полого переходящего в Латвийский прогиб. Ориентировочная ось Белорусского выступа ориентирована в широтном направлении, приближаясь к северо-восточному.

Погребенные своды, к которым можно отнести достаточно обширные области поднятий складочного фундамента, погребенного под более или менее значительной толщей осадочных пород (несколько сот метров, нередко больше тысячи). Геотектонический режим погребенных сводов характеризуется развитием преимущественно нисходящих движений в начале геотектонического цикла и преобладанием восходящих движений в конце его.

Токмовский свод (рис. 2, V) расположен в водораздельной области рр. Мокша и Сура; кристаллический фундамент в наиболее приподнятой части свода находится на глубине 800 м ниже уровня моря. Склоны свода погружаются сравнительно полого, особенно к северу. Ориентировка длинной оси свода меридиональная.

Средневожжский (Самаролукский) свод (рис. 2, VIII) находится в основании Жигулей и распространяется на юг по междуречью Суры и Волги. Глубина залегания фундамента около 1500 м ниже уровня моря, в то время как в прилегающих впадинах он находится на глубине свыше 2500—3000 м. Северный край свода крутой (Жигулевский сброс) и почти широтного простирания, однако длинная ось свода вытянута в меридиональном направлении.

Татарский свод (рис. 2, VII) располагается под Бугульминско-Белевской возвышенностью и протягивается в северо-западном направлении вдоль Вятки к г. Котельнич. В наиболее приподнятых частях фундамента находится на глубине минус 1500 м, понижаясь в стороны прилегающих впадин до 2000—2500 м. Северо-западное продолжение Татарского свода нередко выделяют под названием Котельничского свода (рис. 2, VI).

Башкирский свод (рис. 2, IX) помещается в основании Уфимского плато. Предположение о наличии здесь выступа докембрийского фундамента было высказано впервые А. П. Карпинским. Башкирский свод вытянут в меридиональном направлении, параллельно Уралу и отделен от него Предуральским прогибом, сильно суженным здесь.

Ставропольский свод лежит в основе Ставропольской возвышенности. В отличие от предыдущих сводов, возраст складчатости которых докембрийский, складчатость фундамента Ставропольского свода имеет палеозойский возраст. Простирание свода юго-восточное, параллельное Большому Кавказу.

Тиманский (рис. 2, X) и Донецкий кряжи представляют складчатые сооружения ниже- и верхнепалеозойского возраста; слагающие их породы относительно мало метаморфизованы. Донецкий кряж в юго-восточном направлении погружается и переходит в погребенный Донецко-Мангышлакский кряж.

Области погружений фундамента. Впадины (синеклизы) представляют собой обширные области относительно глубокого погружения складчатого кристаллического фундамента плиты, геотектоническое развитие которых характеризуется преобладанием погружений в течение нескольких геологических периодов, а иногда и эр, относительно большими амплитудами и скоростями вертикальных колебательных движений,

а также большими мощностями осадочных образований и полнотой их разреза по сравнению с выступами и погребенными сводами.

Московская впадина (рис. 2, 1) наиболее обширная из впадин Русской платформы, занимающая пространство между Балтийским щитом на северо-востоке, Белорусским выступом на западе, Воронежским на юге, Токмовским и Татарским сводами на востоке и Тиманским краем на северо-востоке. Длинная ось впадины ориентирована в северо-восточном направлении.

Глазовская впадина (рис. 2, 4) располагается в области Вятско-Камских верховьев к востоку от Татарского и к северу от Башкирского сводов. Впадина изучена еще слабо.

Мелекесская впадина (рис. 2, 5) располагается в области Среднего Поволжья, вклиниваясь между Средневожским сводом на юго-западе и Татарским и Башкирским на севере и востоке; на юго-востоке переходит в Прикаспийскую впадину. Докембрийский фундамент находится на глубине от 1800 до 3000 м.

Прикаспийская впадина (рис. 2, 2) располагается в основе одноименной низменности. Кристаллический фундамент глубокими опорными скважинами еще не вскрыт и находится, предположительно, на глубинах порядка 5000—6000 м. Северо-западные и северные склоны впадины осложнены серией уступов, имеющих сбросовый характер и широтное простираание по северному борту впадины (Жадовский уступ) и почти меридиональное по западному борту (Сталинградский сброс).

Днепровско-Донецкая впадина (рис. 2, 6) находится в области Приднепровской низменности, располагаясь между Украинским щитом на юго-западе и Воронежским выступом на северо-востоке. Кристаллический фундамент в осевой зоне находится на глубине порядка 4000 м. Склоны впадины тоже осложнены серией сбросов, ориентированных в северо-западном направлении.

Причерноморская впадина ограничивает Украинский щит с юга. Ориентирована в широтном направлении. Складчатый фундамент ее южной, Таврической, части, предположительно палеозойский.

Азово-Кубанская впадина является как бы восточным продолжением Причерноморской. Палеозойский возраст ее складчатого фундамента доказан. Простираание впадины юго-восточное, параллельное Кавказу.

Прогибы в пределах плиты представляют собой области относительно неглубоких погружений, являющихся как бы седловинами между выступами и сводами кристаллического фундамента. Для их режима характерно преобладание нисходящих движений на первых этапах геотектогенеза и поднятий — в заключительном.

Ульяновский прогиб (рис. 2, 2) располагается между Токмовским и Средневожским сводами, имея почти меридиональное простираание.

Припятский прогиб (рис. 2, 8) располагается между Украинским щитом и Белорусским выступом, имея почти широтное простираание.

Латвийский прогиб (рис. 2, а) протягивается между Белорусским выступом и Балтийским щитом в широтном направлении.

Оршанский прогиб (рис. 2, б) разделяет Белорусский и Воронежский выступы кристаллического фундамента.

Области предгорных (краевых) впадин представляют собой переходные от платформ к горным областям зоны, отличающиеся весьма глубокими погружениями складчатого, кристаллического фундамента на относительно узком (несколько десятков километров) про-

странстве. Осадочные отложения, заполняющие предгорные прогибы, довольно сильно дислоцированы, особенно вблизи гор.

Предуральская впадина протягивается вдоль западных склонов Урала, разделяясь поперечными поднятиями Уфимского плато и Полудова Камня на три части: Бельско-Симский, Сылвенский и Печорский прогибы.

Предкавказская впадина протягивается вдоль северных склонов большого Кавказа и разделяется Ставропольским сводом на две части: Терско-Кумскую и Кубанскую впадины.

Прикарпатская впадина располагается вдоль северо-восточного края Карпат, параллельно этому горному сооружению.

Таковы основные черты тектонической структуры Русской платформы. Перечисленные здесь структуры являются региональными, располагающимися на больших пространствах и, что важно подчеркнуть, общими как для фундамента, так и для осадочного покрова платформы.

Следует иметь в виду, что, несмотря на определенные успехи в изучении тектоники европейской части СССР, все же некоторые ее части изучены еще недостаточно. Это относится прежде всего к северной, Двинско-Мезенской, части платформы, а также Вятско-Камской, строение которых известно лишь в самых общих чертах, однако общий структурный план Русской платформы обрисовывается достаточно определенно.

При сопоставлении схемы тектонической структуры Русской платформы с ее орогидрографической схемой нельзя не заметить определенного совпадения во многих случаях этих планов.

Так, широтные простирания Причерноморской, Азово-Кубанской и Прикаспийской низменностей почти до деталей согласованы с простираниями соответствующих впадин. Простирания Ергеней и возвышенностей Общего Сырта совпадают с простираниями тектонических уступов, обрамляющих северные и западные склоны Прикаспийской впадины. Даже реки, вступая в область указанных впадин, меняют резко свои направления на широтные или близкие к ним, как это делают Урал, Кума, Дон, Днепр и др.

Северо-западные простирания Воляно-Подольской, Приднепровской возвышенностей, Донецкого кряжа и Приднепровской низменности, а также рр. С. Донца, Днепра, Ю. Буга и Днестра весьма совершенно согласуются с простираниями таких структур, как Донецкий прогиб и Днепровско-Донецкая впадина, а также Украинский щит и Прикарпатская впадина.

Нельзя не обратить внимания на несомненное совпадение простираний Полесской низменности и Припяти с Припятским прогибом, Белорусской возвышенности с Белорусским выступом и Прибалтийской низменности с Латвийским прогибом, а верхнего течения Днепра с Оршанским прогибом. Заметно также совпадение северо-восточных простираний Московской впадины с направлениями многих возвышенностей и крупных рек этой территории.

Наблюдается достаточно много совпадений простираний орографических линий и рек в Заволжье и Приуралье: Бугульминско-Белебеевской возвышенности с Татарским сводом, Жигулей со Средневожжским сводом; направлений рек: Белая, Сим, Сытва, верхняя Кама и верхняя Печора с Предуральским прогибом и т. д.

Одним словом, согласованность направлений орографических линий и многих главных рек с простиранием основных структур Русской платформы настолько в общем велика, что мы не можем не прийти к выводу о существовании причинной связи между ними. Вполне правомер-

ным будет заключение о том, что основные черты орогидрографического плана Русской равнины обусловлены ее структурно-тектоническим планом и, следовательно, тектонический фактор играет определяющую роль в формировании основных черт поверхности равнины.

Важнейшая роль тектонических структур в формировании орографии Русской равнины проявляется также и в известных фактах прямых совпадений положительных и отрицательных элементов орографии с положительными и отрицательными типами тектонических структур Русской платформы. Такие прямые соотношения особенно широко распространены в южной половине платформы. Так, давно известно прямое совпадение Приднепровской и Приазовской возвышенностей с Азово-Подольским щитом, а Приднепровской, Причерноморской, Кубано-Азовской и Прикаспийской низменностей с соответствующими впадинами.

Известно теперь, что в основании Приволжской и Бугульминско-Белебеевской возвышенностей находятся погребенные сводовые поднятия кристаллического фундамента — Токмовское, Средневожское и Татарское, в то время как под низменным Заволжьем располагается Мелекесская впадина. Преобладанием низменностей отличается также и Московская впадина, особенно в ее северной, Беломорской, части, тогда как Воронежский выступ представлен возвышенностью.

Таким образом, есть достаточные основания говорить о том, что определяющее влияние тектонических структур на формирование орографии выражается даже в прямых соответствиях положительных структур возвышенностям и отрицательных структур низменностям, т. е. можно говорить о наличии прямой оротектоники на Русской равнине. Однако, говоря о прямой оротектонике, следует иметь в виду относительный характер соответствия орографии тектоническим структурам и, в частности, рельефу кристаллического фундамента.

Прежде всего необходимо помнить о существенной разнице в амплитудах колебаний рельефа кристаллического фундамента и современной поверхности Русской равнины. Если на поверхности эти амплитуды едва достигают нескольких десятков метров или, не так уж часто, двух-трех сотен метров, то колебания высот кристаллического фундамента достигают многих сот и, очень часто, тысяч метров. Для иллюстрации сказанного приведем совмещенные профили современной поверхности и рельефа кристаллического фундамента между Одессой и Ленинградом (рис. 3).

Во-вторых, следует иметь в виду, что, как правило, контуры подземного рельефа и современной орографии не совмещаются. Так, Средне-Русская возвышенность значительно обширнее Воронежского выступа, распространяется как на север, в область Московской впадины, так и на

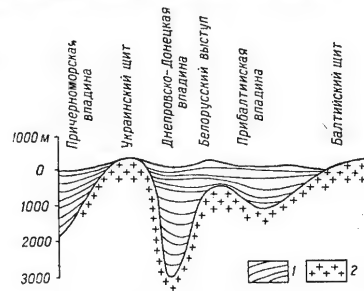


Рис. 3. Орография Русской равнины и рельеф ее фундамента вдоль 30° в. д.
1 — осадочный комплекс, 2 — кристаллический фундамент.

юг, в сторону Рязано-Саратовского прогиба. Украинский щит тоже не совмещается полностью с Волыно-Подольской возвышенностью; последняя захватывает часть Львовской впадины, тогда как северная часть щита заходит в область Полесской низменности. Ось наибольшего погружения кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины проходит, примерно, по линии Полтава — Лохвица, тогда как орографическая ось Приднепровской низменности проходит по долине Днепра.

Таким образом, говоря о прямых соотношениях современной орографии и рельефа кристаллического фундамента, следует иметь в виду не совмещение их контуров, а общее соответствие областей поднятий возвышенностям и наоборот.

Наряду с многочисленными примерами распространения прямой оротектоники на Русской равнине имеются не менее многочисленные примеры несоответствия современной орографии типу тектонических структур. Так, в Прибалтике, современная поверхность которой обладает уклоном к северу, в сторону Финского залива, и к западу, в сторону Балтийского моря, поверхность кристаллического фундамента наклонена к югу и юго-западу. Поверхность кристаллического фундамента Онего-Двинской области падает к востоку, а господствующий уклон современной поверхности северо-западный, в сторону Белого моря. Область Глазовской (Вятско-Камской) впадины с глубоко опущенным кристаллическим фундаментом (глубже 2000 м) представлена в современной орографии Верхнекамской возвышенностью.

Таким образом, на Русской равнине, особенно в ее северной половине, широко распространены обратные соотношения между современной орографией и тектоническими структурами, т. е. имеет место инверсионная оротектоника. Если к тому же мы примем во внимание, что на фоне этих региональных проявлений инверсионной оротектоники имеется множество местных ее проявлений типа Клиско-Дмитровской гряды, Валдайской возвышенности, Силурийского плато и т. д., то может показаться вполне правдоподобным заключение, что в северной половине Русской равнины господствует инверсионная орография.

Обычно, когда мы говорим об инверсионном рельефе, то предполагаем его как следствие длительного воздействия денудационных процессов на первичную поверхность, обративших ее положительные тектонические структуры в отрицательные формы рельефа.

Однако имеются ли достаточные основания полагать, что денудационные процессы могли создать региональные уклоны современной поверхности, которым подчиняются такие реки, как Северная Двина и Мезень, Волга и Волхов? Не вернее ли будет мысль, что эти уклоны созданы новейшими тектоническими движениями, которые преобразовали унаследованную оротектонику, создав наблюдаемую нами инверсионную орографию? Другими словами, мы полагаем, что и широко распространенная инверсионная орография тоже обусловлена тектоническими причинами и является, таким образом, другим типом оротектоники — инверсионной или тектонически обращенной.

Для доказательства справедливости последнего положения нам необходимо обратиться к истории формирования поверхности Русской равнины за достаточно длительный период, чтобы убедиться в том, что тектоническое обращение орографии является такой же закономерностью ее развития, как и наследование оротектонических структур.

Обычно при геоморфологических характеристиках исторический анализ рельефа ограничивается четвертичным периодом. Если такая крайне

укороченная историческая перспектива и допустима при анализе небольшого района, то с ней никак нельзя согласиться при геоморфологическом анализе крупных территорий, потому что при этом исчезает из поля зрения исследователя роль движений тектонических структур в формировании рельефа, что приводит к односторонней переоценке роли экзогенных процессов.

Для успешного решения этой задачи обычный палеогеографический анализ геологического развития территории по геологическим эрам и периодам недостаточен. Мы должны использовать палеотектонический анализ, рассматривающий процесс становления и развития тектонических структур платформы по геотектоническим этапам.

Применение в геоморфологии Русской равнины этого метода облегчается тем, что необходимые исходные данные для него подготовлены уже в работах советских геологов-тектонистов — А. Д. Архангельского, Н. С. Шатского, В. В. Белоусова, М. В. Муратова, А. Б. Ронова, А. А. Бакирова и ряда других исследователей, рассматривавших историю палеотектонического развития Русской платформы в целом или по отдельным ее регионам. Мы попытаемся только интерпретировать их данные по истории развития тектонических структур в разрезе проявления их в орографии Русской равнины.

История развития структур и орографии Русской равнины на протяжении каледонского этапа

Достоверных данных о том, что представляла собой поверхность Русской платформы к началу палеозоя, очень мало. А. Д. Архангельский (1934), основываясь на изучении распространения магнитных аномалий платформы, высказал мысль о структурной и возрастной неоднородности ее фундамента.

Н. С. Шатский, учитывая новые данные, предложил в 1946 г. схему тектоники платформы к началу кембрия. На этой схеме (рис. 4) он выделяет в качестве важнейших структурных элементов складчатого фундамента платформы: 1) докарельские (архейские) массивы, ставшие платформами уже в протерозое; Свекофинийский в области Балтийского моря и Южный, охватывающий всю юго-западную часть платформы в пределах бассейнов Дона, Днестра и Днепра, а также меньшие массивы в Среднем Поволжье и в области Белого моря; 2) области протерозойской складчатости, включившиеся в платформу

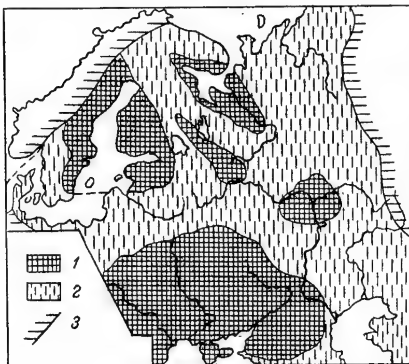


Рис. 4. Строение докембрийского основания Русской платформы. (По Н. С. Шатскому).
1—области архейской складчатости, ставшие платформами в протерозое, 2—области протерозойской складчатости, 3— каледонские геосинклинали Скандинавии и Урала.

в конце протерозоя, занимающие восточную, центральную, западную и северо-западную части платформы.

Схема Н. С. Шатского, несмотря на известную гипотетичность, позволяет все же высказать мнение, что структурная и возрастная неоднородность складчатого фундамента платформы выражалась также и в разнообразии ее рельефа. Это мнение подкрепляется многочисленными фактическими данными, добытыми за последние годы.

Во-первых, наличие во впадинах платформы (Мелекесской, Рязано-Саратовской, Московской, Вятско-Камской и др.) толщи терригенных отложений, представленных кварцевыми, кварцево-полевошпатными, реже аркозовыми песчаниками с прослоями алевролитов и глин, подстилающих фаунистически охарактеризованные свиты среднего девона на востоке платформы, силура и кембрия на западе ее. Эта немая терригенная толща, называемая в Поволжье Бавлинской свитой, на юго-западе Могилевской серией (Шульга, 1952), встречается только во впадинах кристаллического фундамента и совершенно отсутствует на его выступах и, по мнению ряда исследователей (Бакиров, 1954; Митгарц и Толстихина, 1952; Писарчик, 1952; Пистрак, 1950), имеет, по крайней мере в своей нижней части, докембрийский возраст.

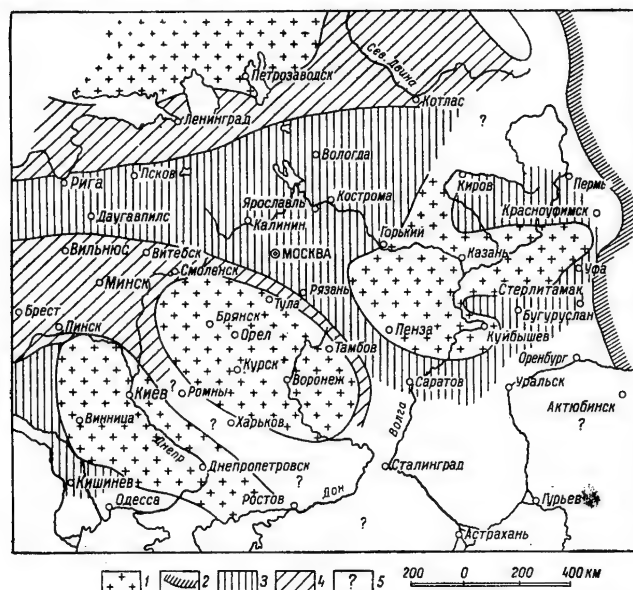
Во-вторых, разведочным и эксплуатационным бурением в Прикамье и Поволжье, а также на западе платформы установлено наличие эрозионных долин разной глубины и размеров, рассекающих кристаллический фундамент. Как отмечает Т. П. Афанасьев (1952), в Среднем Поволжье обнаружены долины глубиной до 300 и даже 600 м и шириной до 500—700 м.

Приведенные факты говорят о том, что необходимо отказаться от представления о докембрийском пенеплене, господствовавшем на Русской платформе к началу кембрия. Напротив, необходимо допустить расчлененную, орографически достаточно сложную поверхность кристаллического фундамента к началу кембрия. Связь крупных неровностей докембрийской суши с тектоническими структурами платформы неясна в настоящее время, но едва ли она может быть принципиально отвергнута. Во всяком случае совершенно очевидна исключительная древность таких структур, как Балтийский, Украинский, Воронежский, Средневожский массивы, которые уже к началу палеозоя выступали в виде возвышенностей, подвергавшихся размыву, а такие структуры, как Московская, Мелекесская, Глазовская, Прибалтийская и другие впадины, являлись областями аккумуляции терригенных отложений и представляли собой низменности.

Каледонский этап развития оротектоники Русской платформы начинается с погружений, охвативших Прибалтику и центр платформы, а также, возможно, бассейн Северной Двины и Прикаспийскую впадину. На западе полоса нижнепалеозойской трансгрессии протягивается от Прибалтики, через Волинь в Приднестровье, заполняя формирующийся Днестровско-Бугский прогиб. В погружение вовлекаются, таким образом, огромные пространства Русской равнины; однако значительные ее части все же остаются сушей: Балтийский щит на северо-западе, Южный, или Сарматский щит, объединяющий Украинский щит, Белорусский и Воронежский выступы, а на востоке Волго-Камский свод (рис. 5).

Анализ фациального состава отложений кембрия и силура, данный в работах Р. М. Пистрак (1950), Б. Б. Митгарц и М. М. Толстихиной (1952) и других, позволяет сделать вывод, что орографические контросты платформы постепенно сглаживаются в течение этого времени, про-

Постепенное сглаживание орографических контрастов и ослабление эрозионных процессов на равнине позволяют считать период погружения платформы периодом нисходящего развития ее рельефа.

[illegible]

Период погружений сменяется в нижнем девоне поднятиями, которые в начале среднего девона охватили всю Русскую платформу. Существенно важно отметить, что поднятия начинаются прежде всего вокруг выступов кристаллического фундамента — Балтийского, Южного, Волго-Камского, которые являются как бы центрами орографических возмываний. Эти поднятия идут с различной скоростью в различных частях платформы и приводят в конечном счете к возрастанию орографических контрастов, о чем свидетельствуют фации начала живетского века, среди которых преобладают пески и глины (Белоусов, 1944; Ронов, 1949).

В ходе развития каледонского тектоорогенеза Русской платформы вполне отчетливо прослеживаются области поднятий, представленные расчлененными возвышенностями, к которым относятся Балтийский щит, Сарматский и Волго-Камский кристаллические выступы, а также Тиманский кряж и области погружений, впадин, представленных эпиконтинентальными морями и низменностями, к которым относятся Прибалтика, западная часть Вольно-Подольи и область верхней Волги, а также, возможно, Печоры и Прикаспийской низменности.

Наиболее существенные выводы, которые вытекают из рассмотрения истории развития Русской платформы в каледонском этапе:

- 1) структурная и орографическая дифференциация платформы — явление очень древнее, унаследованное с докембрийского времени;
- 2) развитие оротектонических движений стоит в определенной связи с развитием Скандинавской (Грампианской) геосинклинали, поскольку наиболее интенсивные колебательные движения происходили в западной и северной частях платформы;
- 3) достаточно ясно определились области устойчивых поднятий (Балтийский, Сарматский и Волго-Камский щиты), представленных возвышенностями, и опусканий Прибалтика, Вольно-Подольи, область верхней Волги и Рязано-Саратовского прогиба, а также, по-видимому, области Печоры, Прикаспия и Предкавказья.

История развития структур и орографии Русской равнины на протяжении герцинского этапа

Герцинский этап развития Русской платформы характеризуется дальнейшим, и притом весьма значительным, усложнением ее тектонической структуры и орографии. Это усложнение особенно сильно проявилось в восточной части платформы, в Волго-Уральской области.

Герцинский этап тектогенеза, как и каледонский, начинается обширными опусканиями, за которыми последовали морские трансгрессии, захватившие к концу живецкого века (средний девон) более 80% площади платформы (Ронов, 1949). Под море уходят не только области впадин, но и многие поднятия частично или полностью перекрываются среднедевонскими морями. Погружаются под уровень моря Белорусский и Воронежский выступы кристаллического фундамента и Тиманский кряж; глубоко погружается и перекрывается морскими осадками Волго-Камский выступ докембрия (рис. 6).

Особенно глубокие погружения имеют место в Волго-Уральской области, в которой не только впадины, но и докембрийские выступы перекрываются толщей отложений девона и карбона во много сотен метров. Именно здесь, в Волго-Уральской области, наиболее наглядно проявляется процесс тектонического обращения положительной докембрийской структуры — выступа кристаллического фундамента — в отрицательную, во впадину.

Процесс обращения положительных орографических выступов в моря наблюдается также и в области Воронежского и Белорусского выступов, хотя амплитуды их погружения значительно меньше. Только Балтийский и Украинский щиты сохраняют свое положение в виде суши, хотя, возможно, и не высокой.

Происходят, однако, не только погружения под уровень моря выступов фундамента, бывших суши на протяжении каледонского этапа. Одновременно с погружениями происходит дробление этих докембрий-

ских массивов-возвышенностей. Распадается Южный кристаллический массив, разделенный развивающейся Днепровско-Донецкой впадиной на две части: Украинский и Воронежский массивы; отчетливо обособляется Белорусский выступ, благодаря развитию Припятского прогиба на юге и Оршанского на востоке.

Но наиболее сильному дроблению подвергся Волго-Уральский кристаллический массив, распавшийся на несколько, все же достаточно

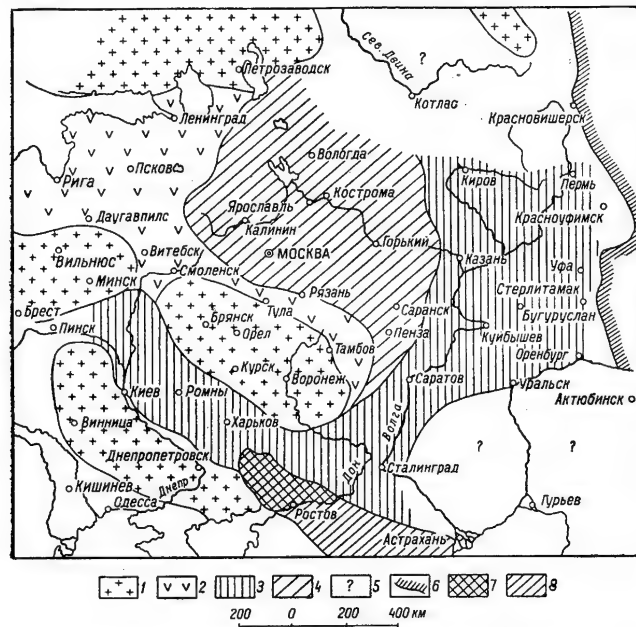


Рис. 6. Схема палеотектоники кристаллического фундамента Русской платформы для каменноугольного периода герцинского этапа тектогенеза. (По А. А. Бакирову).
1 — области поднятия кристаллического фундамента, характеризовавшиеся в течение данного этапа преимущественно восходящими формами движений, 2 — области, присоединявшиеся в течение данного этапа к прилегающим выступам фундамента, 3 — области впадин фундамента, характеризовавшиеся в течение данного этапа преимущественно нисходящими формами движений, 4 — промежуточные области, характеризовавшиеся в течение данного этапа чередованием восходящих и нисходящих движений, 5 — области, структура фундамента которых не выяснена, 6 — геосинклинальная область Урала, 7 — геосинклинальная область Донбасса, 8 — юго-восточное продолжение геосинклинальной области Донбасса.

крупных, частей: Токмовский, Средневожский (Самаролукский), Башкирский и Татарский своды, разделенных прогибами — Ульяновским, Мелекесским и Камско-Занским (Бакиров, 1954).

В первом, нисходящем периоде герцинского тектогенеза происходят интенсивные прогибания, расширения и смещения впадин, унаследованных от каледонского этапа. Смещается к югу зона наибольшего проги-

бания Прибалтийской впадины; расширяется Московская впадина за счет северной части Воронежского выступа и смещается к югу ее осевая зона. По-видимому, этот процесс характерен также и для всех остальных впадин.

Таким образом, погружение выступов фундамента и впадин его представляет собой процесс усложнения унаследованных структур платформ. Однако усложнение унаследованных структур выражается не только в обращении и дроблении выступов, в расширении впадин и смещении их осей, но и в других явлениях.

Усложнение выражается в формировании многочисленных структур второго и третьего порядков, т. е. местных структур (валов, седловин, структурных уступов, флексур, куполов и т. д.), развивающихся в осадочном покрове платформы. В это время возникают валы: Окско-Цнинский, Сурско-Мокшинский, Пугачевский, Сокско-Шешминский, Доно-Медведицкий, Керенско-Чембарский, Солигаличский, Сухонский, Вятский, а также антиклинальные структуры в отложениях девона Вольно-Подольи. Происходит заложение ряда прогибов: Окско-Узольского, Рязано-Костромского, Сурско-Ветлужского, Камско-Зайнского, Львовского и др. Формируются многочисленные структурные уступы в Прибалтике (Лужский, Наровский, Рижский и др.), Валдайский уступ, Большеки-нельская тектоническая ступень, Малокинельские дислокации и другие структуры Заволжья.

Усложнение тектонической структуры выразилось также в увеличении площади платформы на юге за счет приращения складчатых областей Предкавказья и Прикарпатья. Если наличие палеозойского складчатого фундамента на юге Русской платформы было только предположением (Муратов, 1949), то сейчас оно получило фактическое подтверждение в материалах опорного и разведочного бурения в Прикубанье и Молдавии. Составной, хотя и своеобразной частью этого палеозойского складчатого обрамления Русской платформы является Донецко-Мангышлякский край.

Строение южной части палеозойской зоны фундамента представляется достаточно сложным. В Прикубанье, например, она состоит из нескольких более или менее параллельных друг другу структурных поднятий и погружений (Прикубанской депрессии, западного продолжения Ставропольского поднятия, западного продолжения Приманьчской впадины, Ростово-Ергенинского поднятия, Придонской впадины), перекрытых мощным чехлом мезо-кайнозойских отложений (Щерик, 1954).

В Прикарпатье эта палеозойская складчатая зона перекрыта надвинутыми на нее складками флишевых Карпат, и строение ее пока остается неизвестным. В южной Молдавии палеозойское складчатое сооружение вскрыто буровыми скважинами под мощной толщей мезо-кайнозоя.

Период погружений и нисходящего развития рельефа платформы сменяется во второй половине верхней перми поднятиями, которые в триасе и нижней юре охватили всю платформу, превратив ее в обширную сушу.

Однако следует подчеркнуть, что колебательные движения платформы развиваются весьма дифференцированно как во времени, так и в пространстве. Раньше всего, в конце девона, осушается западная часть платформы — Прибалтика, северная Белоруссия, восточная Вольно-Подолья и Прионежье, т. е. области, непосредственно прилегающие к устойчивым положительным структурам — Балтийскому и Украинскому щитам

и Белорусскому выступу. Позже, в нижнем карбоне, выходит из-под уровня моря Воронежский выступ и еще позже, в верхней перми, воздымается, наконец, Волго-Уральский свод в виде отдельных частей — Токмовского, Самаролукского, Татарского и Башкирского сводов. И в самую последнюю очередь, в триасе, осушаются впадины: Московская, Мелекеская и Днепровско-Донецкая, а также, возможно, Прикаспийская и Печорская. Только одна впадина каледонского времени, Рязано-Саратовская, замыкается в конце девона и прекращает свое существование как впадина, обратившись в пологое поднятие, изредка и кратко временно заливавшееся морями нижнего и среднего карбона.

Подведем итоги и сделаем выводы из этого краткого изложения истории палеотектонического развития Русской платформы на протяжении герцинского этапа тектогенеза:

1) в ходе колебательных движений этого этапа отчетливо прослеживаются два периода: начальный, выражающийся в погружениях и развитии трансгрессий эпиконтинентальных морей на платформу и сглаживанием ее орографических контрастов, и заключительный, выражающийся в поднятиях, сопровождающихся регрессиями морей, осушением платформы и возрастанием ее орографических контрастов;

2) ход колебательных движений герцинского этапа стоит в определенной связи с развитием Уральской геосинклинали, поскольку амплитуды колебаний и их частота достигают максимальных значений в Волго-Уральской области, закономерно уменьшаясь к западным частям платформы;

3) происходят усложнение и обращение унаследованных от каледонского этапа тектонических структур, а также образование новых структур и расширение площади платформы за счет замыкания внутренних и краевых впадин;

4) для нисходящей ветви колебательных движений характерны случаи обращения положительных структур путем вовлечения их во впадины (Волго-Уральский свод, Воронежский выступ); в ходе восходящих движений наблюдается обращение отрицательных структур в орографические поднятия в областях, прилегающих к щитам, выступам и сводам кристаллического фундамента (южное крыло Московской впадины, Рязано-Саратовский прогиб);

5) выступы кристаллического фундамента погружаются позже и на меньшую глубину по сравнению с прилегающими впадинами, которые погружаются быстрее и глубже; в период восходящего развития выступы воздымаются быстрее и раньше превращаются в сушу по сравнению с прилегающими впадинами;

6) образование местных тектонических структур в осадочном покрове платформы наблюдается преимущественно на востоке и центре, в той части платформы, которая испытывает наиболее интенсивные колебательные движения вблизи Уральской геосинклинали.

Исходя из приведенных закономерностей тектонического развития Русской платформы в герцинском этапе можно попытаться нарисовать картину, конечно схематическую, орографии Русской равнины в конце перми и в триасе.

На северо-западе и юго-западе равнины поднимались денудационные возвышенности Балтийского и Украинского щитов, рельеф которых можно было бы охарактеризовать, по всей вероятности, как ландшафт островных гор и мелкосопочника, напоминающего рельеф современного центрального Казахстана.

На северо-востоке равнины возвышались невысокие гряды разрушающегося Тиманского кряжа, а на юге подвергались денудации невысокие складчатые структуры Донецко-Мангышлакского кряжа, который не достигал линии вечных снегов, как это показал Д. М. Коненков (1954). По-видимому, не были высокогорными палеозойские складчатые структуры Предкавказья, Молдавии и Прикарпатья, обрамлявшие равнину с юга.

В средней и восточной частях равнины поднимались пластовые, глубоко расчлененные эрозионными долинами возвышенности, возможно, типа современных Ставропольской и Волыно-Подольской возвышенностей. О глубоком эрозионном расчленении в доюрское время Средне-Русской возвышенности говорят многочисленные указания на существование речных долин, погребенных под юрскими и более древними осадками.

Как денудационные возвышенности Балтийского и Украинского щитов, так и пластовые возвышенности средней полосы равнины окаймлялись молодыми береговыми наклонными низменностями, типа теперешней Азово-Кубанской; эти низменности в наиболее пониженных частях сменялись мелководными бассейнами, озерами и лагунами, в которых накапливались терригенные отложения конца верхней перми и триаса.

В этой схематической картине орографии можно отчетливо заметить некоторые существенные черты орографии конца каледонского этапа и, что не менее интересно, существенные черты современного орографического плана Русской равнины. Эти существенные черты проступают в облике таких важнейших элементов оротектоники, как Балтийский и Украинский щиты, как Средне-Русское и Средневожское поднятия, Приднепровское, Прибалтийское и другие понижения.

Развитие структур и орографии Русской равнины на протяжении альпийского этапа

Рассматривая историю колебательных движений платформы в альпийском этапе, мы видим, что он начинается, как и предшествующие геотектонические этапы, с прогибаний, вызвавших трансгрессии, проникших прежде всего в Прикаспийскую и Днепровско-Донецкую впадины в нижней юре. Затем, в средней юре, трансгрессии распространяются по впадинам Волго-Уральской области, а к началу верхней юры — на большую часть платформы, захватив свыше 58% ее территории (Ронов, 1949).

Погружения и трансгрессии продолжают и в течение мелового периода; в это время вовлекается в погружение палеозойская складчатая область Предкавказья и затопляется водами нижнемелового моря. Погружения и трансгрессии продолжают с перерывами до конца мелового периода, завершившись обширнейшей сеноманской трансгрессией, захватившей не менее половины Русской равнины.

Весьма примечательна география юрских и меловых трансгрессий. Характерной чертой ее является распространение по впадинам и прогибам герцинской платформенной равнины; трансгрессии господствуют в Прикаспийской впадине, проникают мелководными морями в Мелекесскую впадину и Ульяновский прогиб (Ульяно-Саратовскую синеклизу), вторгаются в Московскую, Глазовскую и Печорскую впадины.

Воды юрско-меловых трансгрессий заполняют Днепровско-Донецкую впадину, проникают в Припятский, Львовский и Причерноморский про-

гибы, а также в Польско-Германскую впадину и даже частично в Латвийский прогиб. В то же время эти трансгрессии обходят большинство возвышенностей, связанных с выступами кристаллического фундамента: Токмовским, Башкирским и Татарским сводами, а также Тиманским краем; они обходят Украинский кристаллический и Балтийский щиты и лишь частично захватывают Воронежский и Белорусский выступы фундамента. Только Ставропольско-Прикарпатская геантиклинальная зона

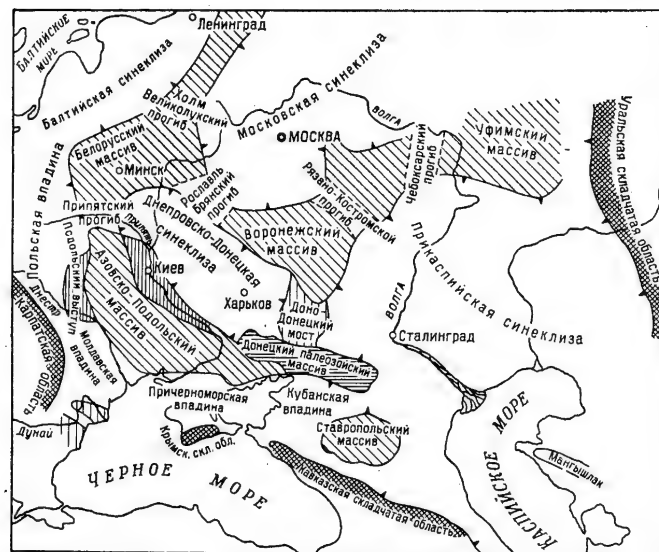


Рис. 7. Схема основных структурных элементов Русской платформы в верхнемеловое время. (По В. Н. Соболевской).

палеозойской платформы вовлекается в погружения и перекрывается мощной толщей мезо-кайнозойских отложений.

Обрисованная география юрских и меловых трансгрессий со всей очевидностью свидетельствует о том, что колебательные движения этого отрезка альпийского тектогенеза унаследовали оротектонику герцинского этапа. Эти унаследованные структуры герцинского времени очень хорошо прослежены В. Н. Соболевской (1951) для предсеноманского времени центра и юга Русской платформы (рис. 7). На составленной ею карте резко выступают области, в которых отсутствуют сеноманские отложения — Украинский щит, Белорусский и Воронежский выступы, Токмовский и Башкирский своды и Донецкий край. Не менее резко выступают также впадины: Московская, Прикаспийская, Днепровско-Донецкая, Львовская, Причерноморская, а также многие структуры местного значения.

Однако колебательные движения альпийского времени, наследуя тектонические структуры герцинского этапа, перерабатывают и усложняют их особенно в южной части платформы, прилегающей к Кавказско-Карпатской геосинклинальной зоне. Возникшая в палеозое горная складчатая страна в Предкавказье погружается под уровень моря, перекрывается мощной толщей мезо-кайнозойских осадков и обращается из горной страны во впадину. Такому же обращению подвергается и Добруджинско-Станиславская гряда, протягивавшаяся в Бессарабии и Прикарпатье в палеозое (рис. 8).

На западе платформы углубляется и расширяется Львовский прогиб, существенно перерабатывавший палеозойскую структуру этого региона. Значительной переработке подвергается также Днепровско-Донецкая впадина, в которой наблюдается смещение к западу оси наибольшего прогибания и образования местных структур типа Каневской дислокации и многих других.

Происходит также дальнейшее развитие и усложнение структур Поволжья и Заволжья, особенно в южной его части, в связи с углублением и расширением Прикаспийской впадины. Не остаются неизменными и структуры центра платформы, такие, как Московская впадина, в которой наблюдается смещение осевой ее зоны к юго-востоку.

В кайнозое также наблюдаются обширные трансгрессии, однако площади, захватываемые ими, неуклонно сокращаются, пока, наконец, не наступает в четвертичном периоде фаза полного осушения платформы. Следовательно, можно охарактеризовать кайнозойскую эру как восходящую ветвь колебательных движений альпийского этапа.

В ходе колебательных движений восходящей ветви альпийского этапа тектогенеза наблюдается дальнейшее развитие оротектоники Русской платформы:

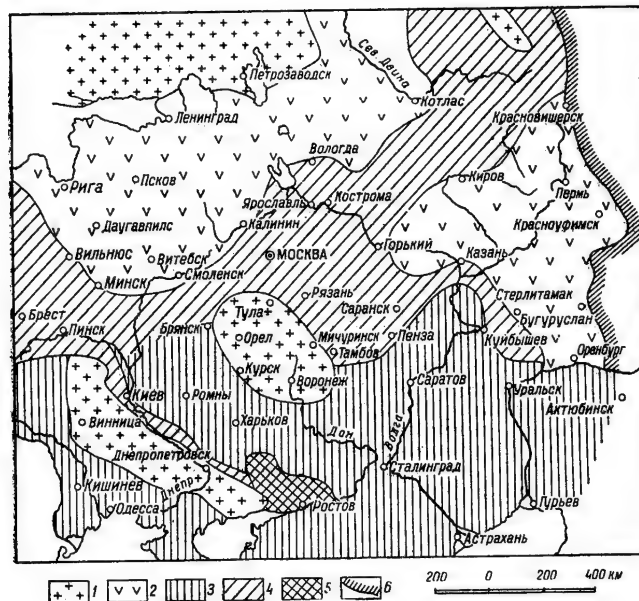
1) раздробление Украинского кристаллического щита на два крупных, сопряженных блока: Подольский и Азовский массивы — разделенных Запорожским понижением (проломом — по Д. Н. Соболеву, 1948); возможно, что и отчленение Калачской возвышенности от Средне-Русской — явление того же порядка, что и отделение Приазовской возвышенности от Приднепровской;

2) обращение отрицательных форм оротектоники в положительные орографические формы. Подобное явление имеет место в западной Подольи, где плато, приподнятое до 400 м над уровнем моря, расположено в области Львовского прогиба; это имеет место также и в Поволжье, в области Приволжской возвышенности, расположенной в значительной его части в полосе Ульяновского прогиба (Ульяновско-Саратовской синеклизы);

3) возрождение положительных структур Предкавказья, выразившееся в создании Ставропольской возвышенности на месте прогиба, существовавшего почти до конца третичного периода;

4) обращение уклонов дневной поверхности некоторых структур по отношению к уклонам поверхности кристаллического фундамента; примерами такого обращения являются Прибалтика и Онего-Двинская область; как уже отмечалось, древняя поверхность Прибалтики наклонена преимущественно к северу, тогда как поверхность кристаллического фундамента падает к югу; такое обращение уклона поверхности Прибалтики объясняется новейшими опусканиями, обусловившими создание впадины Финского залива и Балтийского моря; несомненно, что и обращение

5) формирование ряда новых локальных структур в осадочном покрове и усложнение старых структур (формирование многочисленных структур в Прикарпатье, Манычские сбросы, флексуры Ергеней, Сталинградский сброс и т. д.).



1 — области поднятий кристаллического фундамента, характеризовавшиеся в течение данного этапа преимущественно поднятиями, 2 — герцинины Урала, 3 — области впадин фундамента, характеризовавшиеся в течение данного этапа преимущественно погружениями, 4 — промежуточные области, характеризовавшиеся в течение данного этапа чередованием поднятий и погружений, 5 — герцинская складчатая область Донбасса.

Из изложенного выше следует, что вся история развития поверхности Русской равнины в своих основных чертах тесно связана, обусловлена развитием тектонических структур в ходе колебательных движений. Следовательно, тектонические движения служат импульсом суще-

ственных изменений орографии равнины. Хотя денудационные процессы в своем воздействии на поверхность равнины и эквивалентны воздействию тектонических процессов в перспективе всей геологической истории (Марков, 1948), однако именно колебательные движения являются причиной существенных орографических изменений, приводя к усилению или ослаблению денудационных процессов и предопределяя распределение по равнине областей сноса и аккумуляции. В этом смысле и надо понимать ведущую роль тектонических движений в противоречивом взаимодействии эндогенных и экзогенных процессов, формирующих поверхность Земли в целом и в том числе Русской равнины;

На протяжении всей истории палеотектонического развития Русской платформы прослеживается определенная преемственность, унаследованность основных черт оротектонического плана, выражающаяся в устойчивости важнейших поднятий кристаллического фундамента (Балтийский и Украинский щиты, а также Воронежский, Белорусский и другие выступы и сводовые поднятия фундамента), всегда образующих возвышенности в конце геотектонического этапа; преемственность выражается также в устойчивости важнейших впадин кристаллического фундамента (Прикаспийской, Московской, Днепровско-Донецкой, Печорской и др.), которые всегда являются областями трансгрессий в начале этапа и низменностей в конце его.

История развития оротектоники Русской платформы показывает также определенную направленность в развитии и изменениях структур и орографии, что выражается в тектоническом обращении положительных структур во впадины на нисходящем этапе и вблизи развивающейся на данном этапе геосинклинали (обращение Волго-Уральского свода во впадину в девоне и карбоне, обращение Ставропольско-Прикарпатской геосинклинали в меловое время) и возрождении обращенных и погребенных положительных структур в возвышенности (Токмовский, Средневожский, Татарский своды, Ставропольское поднятие) на восходящем этапе геотектонического цикла.

Происхождение частных (местных) орографических неровностей Русской равнины

Если тектоническая обусловленность крупных черт орографии Русской равнины не вызывает сомнений, то относительно происхождения многих местных возвышенностей и низин (возвышенности и низменности Северо-Запада, Центра, Заволжья и Приволжья и т. д.) мнения геоморфологов сильно расходятся.

Местные орографические формы Русской равнины отличаются большим разнообразием. Одни из них имеют формы асимметричных уступов с одним лишь четко обрисованным склоном и весьма пологим, невыразительным противоположным. К ним принадлежат Валдайская возвышенность, Клинско-Дмитровская гряда, северный край Подольского плато, восточные уступы Приднепровской, Средне-Русской и Приволжской возвышенностей, Ергеней, Донецкого кряжа и многих других, менее известных возвышенностей и гряд. Это одна из наиболее распространенных форм местных возвышенностей.

Другие имеют формы увалов с более или менее симметричными склонами, то более холмистыми и расчлененными, как например Сыртовские возвышенности Заволжья, то весьма плоские и нерезкие, как Северные увалы.

Наконец, некоторые из них встречаются в виде изолированных, но достаточно резко очерченных возвышенностей, как многие возвышенности Прибалтики и Северо-Двинской области.

Не менее разнообразны также и формы местных низин. Некоторые из них имеют хорошо обрисованные линейные формы, напоминающие речные долины, но гораздо обширнее их; другие имеют, и таких большинство, овальные или лопастные и более сложные очертания, что особенно характерно для низин Центра и Севера Русской равнины.

О происхождении асимметричных возвышенностей типа уступов. Асимметричные возвышенности принадлежат к числу наиболее распространенных на Русской равнине; они встречаются как на крайнем севере ее (Беломорско-Кулойский уступ), так и на юге (Ергени, Ставропольская возвышенность).

Сопоставляя взгляды, высказанные различными исследователями в разное время относительно происхождения этих уступов (Мещеряков, 1951 г; Соколов, 1934), можно сделать следующие заключения:

1) асимметричные возвышенности (уступы) северной половины равнины рассматриваются обычно как денудационные, возникшие в местах развития устойчивых пород;

2) асимметричные возвышенности южной половины равнины по преимуществу рассматриваются как тектонические (сбросы, флексуры и т. п.), к числу которых относят Ергени, правый берег Волги от Жигулей до Сталинграда, правый берег Днепра между Киевом и Днепропетровском.

Для правильной оценки роли денудационных процессов в формировании орографических уступов следует сопоставить их распределение с геологической картой. Такое сопоставление обнаруживает удивительное совпадение многих уступов с границами крупных стратиграфических комплексов (рис. 1).

Во всех здесь перечисленных случаях денудационное происхождение этих уступов разделяется большинством исследователей. Признавая также важнейшую роль денудационных процессов в формировании этих уступов, мы все же должны задаться вопросом, чем объяснить совпадение их со стратиграфическими комплексами.

Нас не может полностью удовлетворить ссылка на устойчивость пород, слагающих уступы, потому что, как правило, нет существенных различий в устойчивости пород на уступах и у их подножья; более того, нередко случаи, когда уступы сложены малоустойчивыми песками и глинами, как это имеет место в Клинско-Дмитровской гряде.

Более правдоподобно предположение, что границы стратиграфических комплексов определены тектоническими структурами — валообразными поднятиями, флексурами, структурными террасами и т. п., которые очерчивали границы распространения морей и соответствующих отложений.

Подтверждение этой мысли мы видим, во-первых, в широком распространении подобного явления в южной и средней полосах равнины, где действительно тектонические уступы обуславливают границы стратиграфических комплексов (уступы Ергеней, Приволжской возвышенности, Общего Сырта и Эмбенского плато ограничивают распространение четвертичных отложений Прикаспия), и, во-вторых, в указаниях на наличие валообразных поднятий и тектонических уступов в основе ряда возвышенностей на севере равнины (рис. 9).

Вполне объяснимы наблюдающиеся несовпадения орографических уступов с тектоническими структурами, как это имеет место, например, в Валдайской возвышенности, размещенной несколько восточнее Вал-

дайского вала (Мещеряков, 1950). Очевидно, что уступ постепенно отступил к востоку под воздействием эрозии рек, впадающих в Балтийское море.

Все изложенное приводит нас к такому заключению, что уступы разработаны и оформлены денудационными процессами, но их появление и развитие в данных местах обусловлены наличием тектонических структур и их движениями.

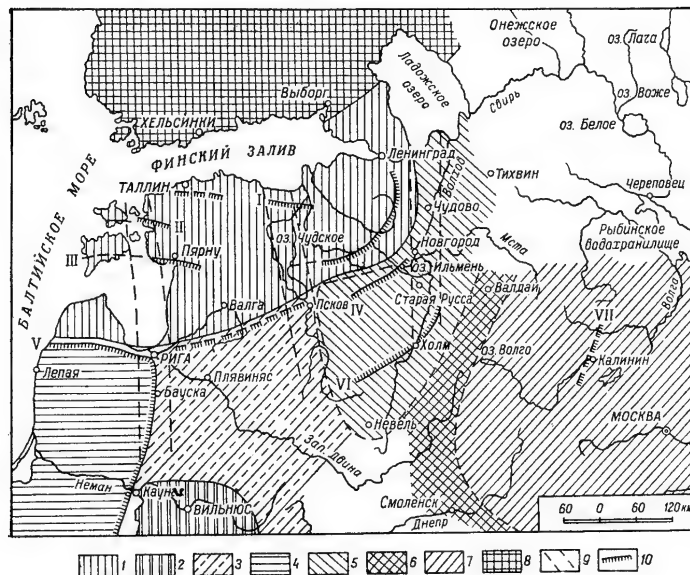


Рис. 9. Схема тектоники Прибалтики. (По Ф. А. Алексееву).

1 — Балтийский выступ фундамента, 2 — Белорусский выступ фундамента, 3 — Латвийская „седловина“, 4 — Восточно-Прусско-Литовская впадина, 5 — Припильменная впадина, 6 — Валдайский вал, 7 — Подмосквовая синеклиза, 8 — Балтийский щит, 9 — зоны вертикальных движений фундамента в нижнем и среднем палеозое, 10 — структурные уступы: I — Наровский, II — Лужский, III — Припильнский, IV — Шелонский, V — Рижский, VI — Холмский, VII — Калининский.

Об отражении в рельефе местных тектонических структур. Высказанное в предыдущем разделе мнение об определяющем значении местных тектонических структур в развитии асимметричных, типа уступов, возвышенностей требует более подробного и на более широком материале рассмотрения вопроса о закономерностях отражения местных тектонических структур (валов, седловин, куполов, тектонических ступеней и пр.) в рельефе.

Ю. А. Мещеряков в одной из своих работ (1951 а) разделил Русскую равнину на 3 зоны по характеру проявления местных структур в рельефе: 1) краевую с преобладанием прямого отражения структур в рельефе; 2) переходную, для которой характерно наличие как прямых, так и об-

ратных соотношений структур и рельефа; 3) внутреннюю, характеризующуюся преобладанием обратных соотношений структур и рельефа.

Мы не имеем возражений по существу данной схемы и считаем, что она правильно отражает общие закономерности географического распределения местных оротектонических соотношений по Русской равнине, но считаем необходимым более подробное рассмотрение этого вопроса по отношению к краевой зоне, для которой выявление местных структур имеет важное значение в нефтепоисковых работах.

Прежде всего необходимо краевую зону Ю. А. Мещерякова разделить по степени проявления структур в рельефе на две части: Волго-Уральскую и Южную. Первая охватывает Прикамье, Среднее и Нижнее Поволжье, исключая Прикаспийскую низменность; вторая включает в себя Прикаспийскую низменность, Предкавказье, Причерноморье, Бессарабию и Прикарпатье.

Волго-Уральская область сформировалась в основных своих чертах в герцинскую эпоху тектогенеза и начиная с конца перми испытывает преимущественно поднятия, если и сменявшиеся погружениями в юре, мелу и палеогене, то относительно неглубокими.

Южная область испытала глубокие погружения в течение альпийского цикла тектогенеза и в большей своей части превратилась в сушу лишь в конце третичного периода, поэтому восходящие движения не успели еще заметно возродить погребенные структуры, распознавание которых по геоморфологическим признакам требует весьма внимательного анализа.

Структуры и рельеф Волго-Уральской области. Известно, что Волго-Уральская область обладает очень сложной орографией. В какой же связи стоит эта сложная орография с ее тектоническими структурами?

Геоморфологи, описывавшие, например, рельеф Приволжской возвышенности (Кузнецов, 1946; Пиотровский, 1945), утверждают, что ее орография — результат почти исключительно деятельности экзогенных процессов. Однако необходимо напомнить, что еще в последней четверти прошлого столетия А. П. Павлов (1887) указал на многие факты обусловленности рельефа Поволжья тектоническими структурами. Позже многие случаи проявления структур в рельефе отмечают А. Д. Архангельский (1911), А. Н. Мазарович (1927), Е. Е. Милановский (1940) и др.

Все же только в последние годы, благодаря широко развернувшимся геолого-структурным съемкам в Поволжье, начала отчетливо выясняться картина зависимости современной орографии от тектонических структур. Наиболее определенно высказывается за наличие закономерных связей между современным рельефом и тектоническими структурами Поволжья Д. К. Андреев (1948, 1949), производивший детальные структурные съемки в области Ульяновско-Саратовской синеклизы. Указанный автор отмечает, что прямая связь современного рельефа с тектоническими структурами выражается в том, что речные долины приурочены к прогибам, разделяющим отдельные поднятия, выделяющиеся в своде Сурско-Мокшинского вала, а водораздельные возвышенности фиксируют своды структур этого вала.

Кроме Д. К. Андреева, эту же прямую зависимость современной орографии от тектонических структур отмечают и многие геологи, занимающиеся структурными съемками Приволжской возвышенности. Так, Е. В. Чибрикова (1951) устанавливает антиклинальную структуру, состоящую из ряда куполовидных поднятий, в полосе высот, разделяющих верховья рр. Сердобы, Медведицы и Узы. Эта антиклинальная

структура является юго-восточным окончанием Керенско-Чембарской зоны поднятий, выраженных в виде Керенско-Чембарской возвышенности.

Весьма интересные данные приводят А. И. Олли и Е. В. Чибрикова (1951) о тектонике Хвалынского Поволжья. Известно, что этот участок Приволжской возвышенности, орографически представленный высотами правого берега Волги (Чернозатонские и Хвалынские горы), рассматривается обычно как составная часть так называемой Вольской котловины, ось которой проходит, примерно, по линии городов Куйбышев и Хвалыньск — бассейн р. Донгуз, а Хвалынское побережье Волги рассматривается как пологая моноклиналь, часть восточного крыла Вольской котловины.

Новые детальные геолого-структурные съемки Хвалынского побережья обнаружили, что в основе данной возвышенности располагается тектоническое поднятие, которое А. И. Олли и Е. В. Чибрикова называют Хвалынским валом. Этот вал представляет собой очень пологое и широкое поднятие, ориентированное в северо-северо-восточном направлении и отделенное от так называемого Палеозойского (Пугачевского) вала Заволжья прогибом, в котором размещается долина Волги. В юго-юго-западном направлении вал погружается и на широте г. Балаково переходит на левый берег Волги и вновь орографически выступает в возвышенностях Урас и Три Мара в Заволжье. Этим погружением Хвалынского вала воспользовалась Волга, делающая здесь крутой поворот к западу между городами Балаково и Вольск. Западное крыло Хвалынского вала осложняется крупной флексурой, образующей правый склон долины р. Терешки, которая приурочена к синклинальному понижению.

Из этих данных, основанных на детальных работах, вытекает по меньшей мере два вывода:

1) хвалынское побережье Волги обладает в целом прямой оротектоникой, а не инверсионной, как это следовало из взгляда на синклинальной природе тектонического строения Вольской впадины;

2) нельзя рассматривать рельеф Хвалынского побережья как эрозионно-останцовый, формирование которого обусловлено только литологией пород при горизонтальном залегании пластов, как это трактуют в своих работах М. В. Пиотровский (1945) и С. С. Кузнецов (1946).

Большой интерес для познания закономерностей отражения местных структур в рельефе представляет Саратовское Поволжье, район саратовских дислокаций. Известно, что здесь наблюдаются как прямые отражения структур в рельефе, так и инверсионные.

Наиболее достоверное объяснение такому явлению, когда в одной и той же тектонической зоне одни структуры (купола) выражены возвышенностями, а другие — понижениями, дал Ю. А. Мещеряков (1952), который указал на то, что обратные соотношения наблюдаются в бассейнах рр. Чардыма и Курдюма, в которых имеют место весьма интенсивные процессы эрозии, связанные с большими уклонами этих рек вследствие больших относительных высот правого берега Волги. Прямые же соотношения наблюдаются в бассейнах притоков Медведицы, где относительные высоты меньше и эрозия значительно слабее. Таким образом, современное размещение зон прямых и обратных соотношений между рельефом и куполовидными структурами в Саратовском районе в основном определяются интенсивностью эрозионных процессов в новейшее время.

Полоса тектонических структур Доно-Медведицкого вала состоит из многочисленных куполовидных поднятий с преобладающим юго-юго-

западным и северо-северо-восточным простираем и отдельных одно от другого поперечными и продольными прогибами. Судя по данным ряда исследователей (Шафиров, 1955, и др.), можно прийти к заключению, что большинство антиклинальных поднятий Доно-Медведицкого вала выражено в рельефе прямо, несмотря на значительное воздействие на них денудационных процессов. Этот факт может быть объяснен только при допущении движения структур этого вала, в частности Арчединской группы поднятий, в четвертичное время.

Прямое отражение в рельефе имеет также Жигулевская антиклинальная структура в целом и ее частные структуры, как это доказано исследованиями В. Н. Лобова (1950), Н. Т. Сазонова (1951), Г. В. Обедиентовой (1953) и др.

Таким образом, весь известный к настоящему времени материал по тектонике Приволжской возвышенности свидетельствует о том, что в по-



Рис. 10. Меридиональный геологический профиль водосборов рек Якла, Урень и Барыш в Ульяновской области. (По Е. Н. Пермякову).

1 — пески верхнесаратовского подъяруса, 2 — пески, песчаники и опоки сеноманской фации палеогена, 3 — мел, 4 — опоки и мергели верхнего сantonа, 5 — мергели и мел турона, 6 — глины и пески альба.

давлиющем большинстве случаев местные структуры имеют прямое отражение в рельефе; обратные соотношения встречаются в тех немногочисленных случаях, когда антиклинальные структуры сложены рыхлыми песками либо находятся в непосредственной близости к Волге, благоприятствующей энергичной эрозии узкой прибрежной полосы (рис. 10).

Отчетливую картину широкого распространения прямой оротектоники дает Высокое Заволжье. Не говоря уже о прямом отображении в орографии Татарского и Башкирского сводов кристаллического фундамента в виде Бугульминско-Белебеевской возвышенности, детальные съемочные, поисковые и разведочные работы (Трофимук, 1950) показали, что и многочисленные местные тектонические структуры разного порядка тоже имеют преимущественно прямое отражение в рельефе.

Так, хорошо выражен в рельефе Сокскими горами Сокско-Шешминский вал, представленный системой куполообразных поднятий и флексурных перегибов, из которых можно упомянуть Елховско-Сергиевскую зону поднятий, выраженную возвышенностями на междуречье Сока и его притока Кундурчи, Шугуровскую антиклиналь в верховьях рр. Шешмы и Зая, Бавлинские поднятия, расположенные в междуречье рр. Ика и Дымки и т. д. (Геологическое строение и нефтеносность Татарской АССР, 1948).

Прекрасно отражены в рельефе структуры южного склона Волго-Уральского свода, обращенного к Прикаспийской впадине. Структуры

этого склона представляют собой серию тектонических ступеней широтного простирания, осложненных куполовидными поднятиями. Здесь выделяется Большекинельская зона поднятий, выраженная полосой возвышенностей, известных под названием Кинельских гор. Зоны тектонических поднятий заполняют также междуречные пространства Б. и М. Кинеля, М. Кинеля и Кутулука, Кутулука и Самары. В то же время речные долины Б. и М. Кинеля и других рек приурочены к зонам прогибов.

Очень хорошо выражены в рельефе структуры Приуралья, в частности южного. Здесь южная часть Предуральского прогиба занята продольными долинами рр. Белой и Сима, а антиклинальные структуры Рязаново-Охлебининского и Сарасово-Аслыкульского валов представлены хорошо выраженными холмистыми возвышенностями, между которыми располагается Уршакско-Деминский прогиб, занятый долиной р. Демы (Богданов, 1946).

Давно известна отчетливая выраженность в рельефе антиклинальных структур Вятского вала в виде Вятских увалов. Современные исследования (Юсупов, 1954) значительно детализируют картину оротектоники бассейна Вятки, установив наличие Камско-Зайнского прогиба, вмещающего устья Вятки и Зая, полосы Кукморско-Уржумских поднятий, выраженных холмистой возвышенностью, протягивающейся вдоль правого берега р. Вятки.

Даже это краткое изложение огромного фактического материала, накопленного нефтяниками Второго Баку по оротектонике Волго-Уральской области, дает вполне достаточное основание для заключения о господстве здесь прямых соотношений между тектоническими структурами и современным рельефом; обратные соотношения для этой огромной территории имеют подчиненное значение.

Чем же объясняется господство прямой оротектоники в Волго-Уральской области? Наиболее вероятное объяснение этого факта заключается в том, что Волго-Уральская область испытывает по преимуществу поднятия в течение весьма длительного времени, во всяком случае в течение неогена и четвертичного периода, что подтверждается большим количеством древних террас в долинах Камы, Белой, Ика и других рек. Тектонические поднятия способствовали постоянному обновлению тектонического рельефа, разрушаемого процессами денудации.

Структуры и рельеф южной части Русской равнины. Южная часть Русской равнины, представленная низменностями, длительное время рисовалась в виде мало дифференцированных впадин — Прикаспийской, Азово-Кубанской и Причерноморской. Их плоские, чрезвычайно слабо расчлененные поверхности даже не подсказывали мысли о возможном существовании в их глубинах погребенных тектонических структур. Только в тех местах, где были налицо отчетливые орографические явления типа Ергеней, Ставропольской возвышенности, Маньчской долины, сравнительно скоро стала очевидной их тектоническая природа.

Развитие геологических исследований, опирающихся на глубокое бурение и геофизические данные, обнаружило сложность тектонического строения некоторых из этих равнинных низменностей уже в предвоенные годы. Так, А. Д. Архангельский (Архангельский и др., 1937) предполагал, исходя из геофизических данных, неоднородность тектонического строения Прикаспийской впадины: он намечал в южной части впадины погребенное продолжение Донецкого кряжа, соединявшегося, по его предположению, с южным окончанием Урала.

К. Г. Маков (1938) доказал наличие ряда синклиналичных и антиклиналичных структур в Причерноморской впадине, выраженных понижениями, вмещающими заливы (Днепровский лиман, Одесский и Егорлыкский заливы), и поднятиями, образующими полуострова (Егорлыкский и Тарханкутский). Эти исследования указывали на наличие в глубине Причерноморской впадины погребенных структур, новейшие движения которых находят прямое выражение в рельефе.

Геофизическими исследованиями в Предкавказье было обнаружено такое распределение аномалий силы тяжести, которое давало основание предполагать наличие в Азово-Кубанской впадине погребенных структур кавказского простираения. Это предположение подтверждалось также результатами повторных нивелировок, проведенных по линии Ростов-Армавир (Левинсон, 1948; Левинсон и Мещеряков, 1951).

Проведенные в послевоенные годы опорные и разведочные бурения обнаружили наличие погребенных структур палеозойского возраста, образующих весьма сложный подземный рельеф, схематическое изображение которого приведено на профиле и карте тектонического строения Прикубанской низменности, составленной Е. А. Щерик (рис. 11).

На этой схеме подтверждается кавказское простираение погребенных структур, что находит свое выражение, в частности в плане параллельных речных долин низменности, обладающих тем же кавказским направлением. Весьма показательно, что зоны погребенных поднятий (например, продолжение Ставропольского) выражены водораздельными повышениями и, в частности, Ейским полуостровом.

Безусловно, что тектоническая схема Е. А. Щерик

дает весьма упрощенное представление о тектонике Азово-Кубанской низменности, но даже в этом виде можно отметить определенное выражение погребенных структур в ее орогидрографии.

Исследования глубинной геологии Прикаспийской низменности, опирающиеся на геофизические (преимущественно) и буровые данные (Бакиров, 1954; Вахрушев и Рождественский, 1953; Неволин, 1951), показывают, что основные черты ее структуры имеют прямое выражение в рельефе (рис. 12). Прежде всего отмечается выраженная четким орографическим уступом серия молодых тектонических сбросов, известных под названием Сталинградского сброса, ограничивающих с запада Прикаспийскую впадину от Ергеней до границы с Саратовской областью. Сталинградский сброс проходит параллельно Волге, несколько восточнее ее; небольшое несовпадение орографического уступа с тектониче-



Рис. 11. Схема тектонического строения Прикубанской низменности. (По Е. А. Щерик).

ским объясняется отступанием правого берега Волги к западу, согласно закону К. Бэра.

Продолжение Сталинградского сброса к востоку, названное Жадовским уступом, проходит по линии Красный Кут — Ершово и зафиксировано долиной р. Еруслан, а от Жадова до Уральска, на значительном протяжении — долиной р. Деркул (приток Урала) и высотами Деркульского увала с выходами меловых и палеогеновых пород.

Второй тектонической линией этого региона является так называемый Прикаспийский уступ, представленный весьма четким орографическим уступом, ограничивавшим с севера распространение Хвалынской трансгрессии. Вполне очевидно, что абразионная деятельность этого моря несколько отодвинула к северу орографический уступ по сравнению с тектоническим.

Исследованиями (Мещеряков, 1952) установлено также, что солянокупольные структуры Прикаспийской низменности тоже большей частью прямо выражены в рельефе, то весьма резко в виде возвышенностей типа Богдо, Индерских гор и компенсационных мульд, вмещающих озера (Эльтон, Баскунчак, Индерское и др.), то преимущественно в виде едва заметных повышений и компенсационных понижений, обнаруживаемых при детальном геологических и геоморфологических исследованиях.

Солянокупольные структуры, согласно исследованиям Ю. А. Мещерякова, очень четко отражаются в продольных профилях и строении речных долин Прикаспийской низменности. Так, например, продольный профиль р. Урал в пределах низменности имеет ступенчатый характер: участки крутого падения чередуются с участками, где падение значительно уменьшается, причем все без исключения участки крутого падения приурочены к тем местам долины, где расположены соляные купола. В строении долины р. Урала замечается такая закономерность: там, где река протекает по межкупольным пространствам, долина широка, уступы террас сглажены, пойма хорошо развита, изобилует старицами и меандрами, русло широко и извилисто; там же, где в долине расположены солянокупольные поднятия, долина суживается, уступы террас становятся более четкими, пойма развита слабее, поверхность ее иногда выпуклая, русло узкое, спрямленное.

Подобная закономерность характерна и для профилей рек и строения долин Б. и М. Узней, только в меньшей степени проявления, чем для Урала.

Следует отметить, что еще раньше, в 1948 г., подобная зависимость конфигурации правого берега Волги от распределения тектонических структур была отмечена М. Ф. Колбиным (1948).

Тектоническое строение Бессарабии до последнего времени было почти неизвестно. Только обширные геофизические, буровые и геологосъемочные работы, проведенные в послевоенные годы, пролили некоторый свет на глубинную геологию этой территории, занимающей промежуточное положение между Украинским кристаллическим щитом, Карпатским складчатым сооружением и Причерноморской впадиной.

Положение Бессарабии между этими крупнейшими региональными структурами обусловило сложность ее тектонического строения, многие черты которого все еще неясны. Сложность тектонического строения в свою очередь обуславливает сложность ее орографического устройства.

На Гипсометрической карте европейской части СССР достаточно четко выделяются орографические районы Бессарабии:

- 1) Причерноморская низменная равнина, дренируемая консеквентной сетью параллельных рек, оканчивающихся лиманами и озерами;
- 2) Бессарабская возвышенность, состоящая из Баймаклийских высот, занимающих пространство в юго-западном углу Бессарабии между рр. Прут и Ялпук; Кодр, или Центрально-Бессарабской возвышенности (наиболее приподнятой части Бессарабии), обладающей радиально расходящимся планом речной сети; Белецкой волнистой равнины (Белецкой

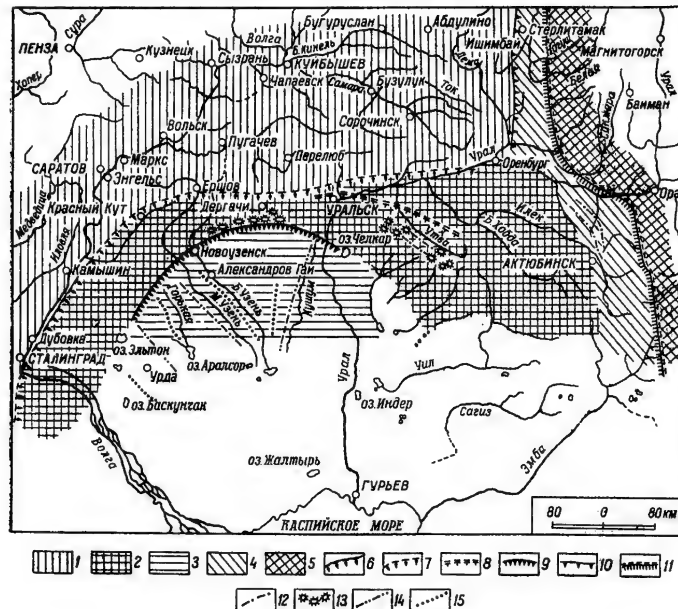


Рис. 12. Схема геотектоники северной части Прикаспийской депрессии. (По Г. В. Вахрушеву и А. П. Рождественскому).

1 — юго-восточная крайняя зона Русской платформы, 2 — промежуточная зона, 3 — Прикаспийская зона, 4 — Предуральская депрессия, 5 — складчатый Урал, 6 — Жаловский тектонический уступ, 7 — предполагаемое продолжение Жаловского уступа, 8 — предполагаемое разветвление Жаловского уступа, 9 — Прикаспийский тектонический уступ, 10 — западный борт Предуральской депрессии, 11 — западная граница складчатого Урала, 12 — тектонические линии, сопровождаемые солянокупольными структурами, 13 — открытые купола, 14 — намечающиеся направления зон новейших тектонических поднятий, 15 — намечающиеся направления зон новейших тектонических опусканий.

степи), относительно пониженной части Бессарабии; Котюжанских высот, приподнятой и сильно расчлененной возвышенности, расположенной между рр. Днестром и Реут; Северо-Бессарабской возвышенности, занимающейся на севере Хотинской грядой, отделяющей Бессарабию от Прикарпатья. Таким образом, большая часть Бессарабии занята возвышенностями, густо расчлененными речной и овражно-балочной сетью.

Сопоставляя орографию и гидрографию Бессарабии с полученными в последние годы данными по ее тектоническому строению, мы прихо-

дим к заключению о господстве здесь прямых соотношений между структурами и рельефом, в чем нас убеждают следующие факты:

1. Причерноморская низменная равнина Бессарабии располагается в области Придубруджинской ветви Причерноморской впадины. Любопытно отметить, что заданная часть этого Придубруджинского передового прогиба севернее г. Болград фиксируется схождением притоков р. Ялпуг, а также снижением высот террас.

2. Баймаклийские высоты располагаются в полосе относительно неглубоко погруженного здесь палеозойского складчатого кряжа — Добруджинско-Станиславской гряды, протягивающегося далее в основании Молдавской возвышенности.

3. Долина р. Прут образовалась вдоль контакта погребенной складчатой структуры Добруджинско-Станиславской гряды с платформенной структурой центральной и северной Бессарабии;

4. Долина р. Днестр проходит по юго-западной границе Украинского кристаллического щита; в Бессарабии кристаллический фундамент и кроющие его палеозойские и меловые отложения быстро погружаются на значительную глубину под третичные (неогеновые) отложения;

5. Хотинская гряда, ограничивающая Бессарабию с севера, сформирована тектоническими поднятиями (Ласкарев, 1905).

В заключение этого краткого обзора соотношения тектоники и орографии Бессарабии необходимо отметить, что представление о едином «приподнятом блоке нижнего палеозоя», занимающего центр и север Бессарабии, требует некоторых оговорок. Во-первых, название структуры Бессарабии приподнятым блоком имеет смысл только по отношению к Предкарпатскому прогибу, потому что кристаллический фундамент Бессарабии опущен на глубину свыше 1000 м и по отношению к Украинскому щиту является впадиной, входящей в состав более обширной Днестровско-Бугской впадины. Во-вторых, эта впадина, вне всякого сомнения, весьма дифференцирована местными структурами, «блоками», одним из которых является возвышенность Кодры (Центрально-Бессарабская), тектоническое происхождение которой отстаивается многими исследователями (Гофштейн, 1952; Дикенштейн, 1953).

Весьма вероятно, что и обособление таких орографических районов Бессарабии, как Белецкая равнина, Котюжанские высоты и Северо-Бессарабская возвышенность, имеет тектоническую природу.

Прикарпатье, как и Бессарабия, обладает сложной орографией, выраженной по преимуществу возвышенностями, хотя и располагается в области передового Предкарпатского прогиба. Таким образом, Прикарпатье обладает как будто бы обратной оротектоникой. Однако если мы учтем, что тектоника и орография Прикарпатья находятся в генетической связи с тектоникой и орографией складчатой зоны Карпат, то мы согласимся с тем, что здесь имеет место прямая оротектоника, потому что Прикарпатье по отношению к Карпатам является пониженной областью, что, между прочим, нашло выражение в названии «Подоллия», закрепившемся в конце концов за территорией севернее р. Днестра.

Поверхность Прикарпатья представляет сложное сочетание возвышенностей и низменностей, в плане распределения которых наблюдается любопытная закономерность.

В юго-восточной части Прикарпатья, между городами Станислав и Черновцы, преобладает продольный план орографии: возвышенности и низины протягиваются параллельно Карпатам, образуя удлинённые и значительно расчленённые гряды. Таких гряд имеется четыре: При-

днестровская, образующая междуречье Днестра и Прута, Покутская — на междуречье Прута и Черемоша, Черновицкая — между Прутом и Серетом и, наконец, Подгорная — между Серетом и краем Карпат. Продольный план орографического расчленения юго-западного Прикарпатья стоит в связи с направлением здешних рек — Днестра, Прута и Серета, протекающих параллельно Карпатам и разделивших своими долинами эту территорию на ряд продольных грядовых возвышенностей.

В северо-западной части Прикарпатья преобладает поперечный к Карпатам план орогидрографии. Продольным по отношению к Карпатам направлением обладает здесь только р. Днестр, а все его правые притоки рассекают своими долинами поверхность Прикарпатья вкрест простирания Карпат, образуя междуречные гряды, особенно хорошо выделяющиеся между рр. Ломница, Быстрица, Свича и Стрый.

Причина отмеченной противоречивости в планах орогидрографии Прикарпатья кроется в особенностях его тектонического строения. Основные тектонические линии Предкарпатского прогиба — антиклинальные структуры, синклинали прогибы и надвиги — имеют простирания, параллельные Карпатам, но в то же время наблюдаются и поперечные к Карпатам структуры, разделяющие прогиб на ряд ванн (Михайлов, 1951).

Северо-западная часть Прикарпатья отличается более сложным тектоническим строением, в котором наряду с продольными структурами большое значение имеют и поперечные, потому что северо-западная часть Предкарпатского прогиба наложилась и переработала южное окончание Львовской впадины, сформировавшейся еще в меловое время (Найдин, 1953).

В большинстве случаев местные структуры Предкарпатского прогиба прямо выражены в рельефе: антиклиналы в виде возвышенностей (Слободы Рунгурской, Тлумачской, Журавненской и др.), а сбросы и флексуры в виде уступов и котловин (Станиславская и Калушская котловины, Оброшинский, Ширецкий, Николаевский и другие уступы).

Весьма любопытными особенностями оротектоники обладает Львовская, или, точнее, Львовско-Люблинская впадина. В целом она выражена низменностями, среди которых поднимаются в ряде мест отчетливо выраженные возвышенности в пределах СССР: Ростоцье, Волинское и западная часть Подольского плато (Ополье).

Чрезвычайно поучительным оказалось положение Ростоцья. Последнее является резко очерченной грядой, разделяющей бассейны Западного Буга и Сана; по данным геофизики, она расположена почти над осью впадины. Вследствие этого Ростоцье часто приводилось в качестве примера инверсионного рельефа, созданного эрозийной деятельностью притоков Буга и Сана, борющихся за овладение этим водоразделом. Только совсем недавно буровая скважина, заложенная на склонах Ростоцья, вскрыла на относительно небольшой глубине под меловыми отложениями нижнепалеозойскую складчатую структуру, воздымание которой и обусловило эрозийную препарировку Ростоцья. Таким образом, подтвердилось предположение польского геолога В. Тейсейра (Teisseyre, 1894), проводившего здесь тектоническую линию.

На тектоническую обусловленность Волинского плато давно указывал В. Д. Ласкарев (1914), обнаруживший дислокации в районе с. Пельчи.

Спорным до сих пор остается происхождение крутого уступа северного края Подольского плато. За тектоническую природу этого уступа

высказывались В. Тейсейр (Teisseyre, 1893), И. Смоленский (Smolenski, 1910) и другие польские геологи. Чисто денудационное происхождение уступа отстаивали С. Павловский (Pawlowski, 1911) и особенно А. Циргофер (Zierhofer, 1927). Если же учесть данные по наличию тектонических структур в основании Росто́чья и Волынского плато, то можно вполне уверенно утверждать, что локализация денудационных процессов по северному краю Подольского плато обусловлена тектоническими поднятиями.

Общие выводы

1. Существенные изменения орографии Русской равнины на протяжении всей истории ее развития всегда исходили из колебательных движений тектонических структур платформы, причем распределение этих движений, их амплитуды и частоты тесно связаны с развитием действующих на том или ином этапе геосинклиналей.

2. Современная орография Русской равнины — это создание не только и не столько четвертичного периода, сколько итог длительной, по меньшей мере всей послепермской истории развития платформы, в которой отчетливо прослеживаются как древние, унаследованные черты орографии, так и новые черты, возникшие в результате позднейших тектонических движений.

3. Степень выраженности структур в орографии зависит от двух главных причин: во-первых, от длительности и устойчивости тектонических движений и; во-вторых, от интенсивности новейших (четвертичных) движений структур, способствующих их обновлению. В областях поднятий тектонические структуры всегда выражены в орографии резко, так как с денудационными процессами связаны откапывание и препарировка структур. В областях недавних, неогеновых и в особенности четвертичных, погружений тектонические структуры всегда значительно замаскированы плащом новейших отложений; важнейшими геоморфологическими признаками, помогающими уловить эти замаскированные структуры, является план гидрографической сети, строение речных долин, густота и глубина эрозийной сети, а также морфология морских и озерных побережий.

4. Наличие обратных соотношений между орографией и тектоническими структурами регионального значения (типа Средне-Русской возвышенности или Прибалтики) есть результат тектонического обращения, а не следствие денудационных процессов. Инверсии рельефа денудационного происхождения имеют ограниченное распространение и действительны только по отношению к местным структурам при следующих условиях: а) при наличии интенсивной денудации тектонических структур реками, энергично удаляющими продукты выветривания и эрозии; б) при наличии рыхлых отложений в сводах структур; в) при весьма длительном воздействии денудационных процессов на медленно воздымающиеся структуры, что ведет в итоге к некоторому смещению орографических уступов по отношению к тектоническим формам (Балтийский глинт, Валдайская возвышенность и т. п.).

5. Возникновение денудационных уступов многих возвышенностей Русской равнины предопределено существованием тектонических структур; последние ограничивали распространение морских трансгрессий, а их движения создавали предпосылки для усиления денудационных процессов и препарировки орографических уступов.

Сформулировав эти выводы, имеющие, по нашему убеждению, характер закономерностей проявления тектонических структур в рельефе равнин, мы отчетливо представляем себе их неполноту (в особенности для северной части Русской равнины, а также в отношении тектонической обусловленности гидрографической сети, что должно быть специальной темой исследований) и некоторую нарочитую остроту и дискуссионность ряда положений. Но мы и не задавались целью полного разрешения этой проблемы. Мы будем вполне удовлетворены, если вызовем своей статьей дискуссию и привлечем этим внимание географов к использованию ценнейшего материала, добываемого советской геологией.

Литература

- Аванесян Г. М. (1954). Геологическое развитие Молдавской депрессии. Изв. АН СССР, сер. геол., 1.— Андреев Д. К. (1948). О закономерностях связи рельефа со структурными формами и об их роли для изучения тектоники Приволжской возвышенности. Бюлл. МОИП, отд. геологии, т. 33, вып. 4.— Андреев Д. К. (1949). Зависимость современного рельефа Ульяновско-Саратовской синеклизы от геологического строения. Тр. Моск. фил. ВНИГНИ, вып. 1.— Анучин Д. Н. (1895). Рельеф поверхности Европейской России в последовательном развитии о нем представлений. Землеведение, т. II, кн. 1. (Перенесена в книгу: Д. Н. Анучин и А. А. Борзов. Рельеф Европейской части СССР. Географиз, 1948).— Архангельский А. Д. (1911). Среднее и Нижнее Поволжье. (Материалы к его тектонике). Землеведение, т. 18, кн. 4.— Архангельский А. Д. (1934). Геологическое строение СССР. Гостеолиздат.— Архангельский А. Д. (1947). Геологическое строение и геологическая история СССР. Гостеолиздат.— Архангельский А. Д., Н. В. Розе, В. В. Колубакин и А. И. Падеревская. (1937). Тектоника докембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы по магнитным данным. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 2.— Афанасьев Т. П. (1952). К геологии Среднего Поволжья и Прикамья. ДАН, СССР, т. 86, № 5.— Бакиров А. А. (1954). Современные представления о геологическом строении кристаллического фундамента Русской платформы (по данным опорного бурения). Тр. Акад. нефт. хоз., вып. 1.— Белоусов В. В. (1944). Фации и мощности осадочных толщ Европейской части СССР. Тр. Инст. геол. наук АН СССР, вып. 76.— Белоусов В. В. (1954). Основные проблемы строения турнейского континента в южном Подмосковье. Тр. Моск. фил. ВНИГНИ, вып. 2.— Богданов А. А. (1946). Тектоника Ишимбаевского Приуралья. Изд. МОИП.— Борзов А. А. (1948). Орографический и геоморфологический очерк Европейской части СССР. В кн.: Д. Н. Анучин и А. А. Борзов. Рельеф Европейской части СССР. Географиз.— Брод И. О. и Н. Ю. Успенская. (1948). Основные черты строения, условия и перспективы нефтеносности Башкирского Приуралья. Тр. Моск. нефт. инст., вып. 8.— Бэр К. М. (1856). О каспийском рыболовстве. Статья IV, Журн. Мин. гос. имуществ, отд. II.— Васильев Ю. М. (1951). К вопросу о существовании погребенного герцинского складчатого сооружения на севере Прикаспийской низменности. ДАН СССР, т. 81, № 5.— Вахрушев Г. В. и А. П. Рождественский. (1953). О тектонике северной части Прикаспийской депрессии. Изв. АН СССР, сер. геол., 4.— Веселовская М. М. и А. Г. Завидонова. (1952). Докембрийская толща Калужского поднятия по материалам глубокого бурения. Изв. АН СССР, сер. геол., 1.— Вялов О. С. (1953). Общее структурное подразделение западных областей УССР. Изв. АН СССР, сер. геол., 5.— Вялов О. С. (1955). К геологии фундамента Предкарпатского передового прогиба. Уч. зап. Львовск. гос. ун-ва, т. XXXV, вып. 8.— Геологическое строение и нефтеносность Татарской АССР. (1948). Сборник статей. Гостехиздат.— Герасимов И. П. (1946). Опыт геоморфологической интерпретации общей схемы геологического строения СССР. Сб. «Проблемы физической географии», XII, Изд. АН СССР.— Герасимов И. П. (1948). Общая схема истории развития рельефа западной части СССР. Тр. II Всесоюз. геогр. съезда, 2.— Геренчук К. И. (1950). Геоморфология Подолья. Уч. зап. Черновиц. гос. ун-ва, т. VIII, сер. геол.-геогр., вып. 2.— Геренчук К. И. (1950б). Опыт тектонической интерпретации общей орографической схемы Русской равнины. Уч. зап. Черновиц. гос. ун-ва, т. VIII, сер. геол.-геогр., вып. 2.— Геренчук К. И. (1953). Орогенез Украинской ССР. Уч. зап. Черновиц. гос. ун-ва, т. X, сер. геол.-геогр., вып. 3.— Гофштейн И. Д. (1952). Схема тектоники Бессарабии. Бюлл. МОИП, отд. геологии, т. XXVII,

вып. 6.— Дикенштейн Г. Х. (1953). Основные черты структуры западной части Русской платформы в нижнем палеозое. Бюлл. МОИП, отд. геологии, т. XXVIII, вып. 4.— Докучаев В. В. (1878). Способы образования речных долин Европейской России. СПб.—Зеккель Я. Д. (1945). Значение истории развития структур страны в формировании равнинного рельефа. Сов. геология, сб. 8.—Зеккель Я. Д. (1948). О факторах, обуславливающих конфигурацию Русской равнины. Изв. ВГО, т. 80, №3.—Зеккель Я. Д. (1953). Некоторые основные черты в устройстве поверхности Русской равнины. Изв. ВГО, т. 83, № 1.—Колбин М. Ф. (1948). Новые данные по геоморфологии, тектонике и гравитационной характеристике куполовидных поднятий по правобережью Волги южнее Сталинграда. Бюлл. МОИП, т. XXIII, вып. 6.—Каманин Л. Г. (1953). К вопросу о палеогеографической природе Кодра в Центральной Бессарабии. Тр. Инст. географии АН СССР, 58.—Карпинский А. П. (1894). Общий характер колебаний земной коры в пределах Европейской России. Изв. Акад. наук, 1.—Карпинский А. П. (1919). К тектонике Европейской России. Изв. Акад. наук.—Коненков Д. М. (1954). Некоторые особенности формирования Донецкого кряжа. Изв. АН СССР, сер. геогр., 5.—Корценштейн В. Н. (1951). К вопросу о тектонике западного Причерноморья. ДАН СССР, т. 81, № 6.—Кузнецов С. С. (1946). О геоморфологии газонефтеносных земель Саратовского Поволжья. Изв. ВГО, т. 78, № 4.—Ласкарев В. Д. (1905). Заметки по вопросу о тектонике южнорусской кристаллической полосы. Изв. Геол. ком., т. XXIV.—Ласкарев В. Д. (1914). Общая геологическая карта России, лист 17. Тр. Геол. ком., вып. 77.—Левинсон В. Г. (1948). О погребенной структуре Кубано-Азовской депрессии. Сов. геология, 36.—Левинсон В. Г. и Ю. А. Мещеряков. (1951). Современные тектонические движения в северном Предкавказье по данным повторного нивелирования. Пробл. физ. географии, сб. XVII.—Лобов В. Н. (1950). Южно-Жигулевская дислокация. ДАН СССР, т. 72, № 1.—Мазарович А. Н. (1927). Из области геоморфологии и истории рельефа Нижнего Поволжья. Землеведение, т. 29, кн. 3—4.—Маков К. И. (1938). Про геологичну будову Причорноморської западини. Геологічний журнал АН УРСР, т. V, вып. 4.—Марков К. К. (1948). Основные проблемы геоморфологии. Географиз.—Мещеряков Ю. А. (1950). О морфологической структуре северо-запада Русской равнины. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 4.—Мещеряков Ю. А. (1951а). Об отражении в рельефе Русской равнины антиклинальных структур типа валов и куполов. ДАН СССР, т. 79, № 1.—Мещеряков Ю. А. (1951б). Об основных закономерностях строения и развития крупных форм рельефа Русской равнины. ДАН СССР, т. 79, № 2.—Мещеряков Ю. А. (1952). К геоморфологии района Саратовских дислокаций. Тр. Инст. географии АН СССР, 51.—Мещеряков Ю. А. (1953). Новейшая тектоника северного Прикаспия. Сб. «Стратиграфия четвертичных отложений и новейшая тектоника Прикаспийской низменности», Изд. АН СССР.—Митгарц Б. Б. и М. М. Толстихина. (1952). Основные этапы развития в палеозое докембрийского фундамента в западной части Русской платформы. Сб. «Материалы по геологии Европейской части СССР», Гостеоиздат.—Михайлов А. Е. (1951). Основные этапы развития Предкарпатского передового прогиба. Бюлл. МОИП, т. XXVII, вып. 3.—Муратов М. В. (1949). Тектоника и история развития альпийской геосинклинальной области юга Европейской части СССР и сопредельных стран. Тектоника СССР, II.—Муромцев А. С. (1954). К вопросу о геологическом строении Львовской мульды. Геол. сборник Львовского геол. общества 1.—Найдин Л. П. (1953). Основные черты тектоники Львовско-Люблинской мульды. Бюлл. МОИП, т. XXVIII, вып. 3.—Никитин С. Н. (1895). Бассейн Оки. Труды экспедиции исследования источников главных рек Европейской России, 1.—Николаев Н. И. (1933). К вопросу о тектонике и стратиграфии Саратовского и Самарского Заволжья. Бюлл. МОИП, т. XI, вып. 2.—Николаев Н. И. (1949). Новейшая тектоника СССР. Тр. Ком. по изуч. четверт. периода, VIII.—Обидиентова Г. В. (1953). Происхождение Жигулевской возвышенности и развитие ее рельефа. Тр. Инст. географии АН СССР, 53.—Оли А. И. и Е. В. Чибрикова (1951). Новые данные о тектонике Хвалынского-Вольского Поволжья. Уч. зап. Саратовск. гос. ун-в., т. XXIII, геол.—Павлов А. П. (1887). Самарская Лука и Жигули. Тр. Геол. ком., т. II, № 5.—Пиотровский М. В. (1945). К изучению основных черт рельефа Нижнего Поволжья. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 2.—Писарчик Я. К. (1952). Материалы к характеристике древней коры выветривания северного склона Воронежского кристаллического массива. Сб. «Материалы по геологии Европейской части СССР».—Пистрак Р. М. (1950). Структура Русской платформы в девонское и нижнекаменноугольное время. Бюлл. МОИП, отд. геологии, т. XXVI, № 2.—Рождественский А. П. (1953). О связи некоторых излучин Волги с местной тектоникой. ДАН СССР, т. 90, № 3.—Розанов Л. Н. (1947). Особенности морфологии структуры Заволжья. Сов. геология, 11.—Ронов А. Б. (1949). История осадконакопления и колебательных движений Европейской части СССР. Тр. Геофиз.

инст. АН СССР, 3 (130).—Сазонов Н. Т. (1951). Тектоническое строение Жигулевской и Борлинской зон дислокаций. Тр. Моск. фил. ВНИГНИ, 2.—Славин В. И. (1947). К вопросу о стратиграфии и тектонике Карпатского передового прогиба. Сов. геология, 23.—Соболев Д. Н. (1948). Геология УССР. Аннотация в «Ученых записках Харьковского гос. университета», т. 9, геол.—Соболевская В. Н. (1951). Палеогеография и структура Русской платформы в верхнемеловую эпоху. Сб. памяти акад. А. Д. Архангельского, Изд. АН СССР.—Соколов Н. Н. (1934). Некоторые данные о рельефе Валдайской возвышенности. Тр. Почв. инст. АН СССР, т. 10, вып. 1.—Соколов Н. Н. (1953). Новейшие данные о докембрийском фундаменте Русской платформы. Изв. ВГО, т. 85, вып. 2.—Соколов Н. Н. (1954). Особенности рельефа Московской области. Сб. работ Центр. музея почвоведения, 1.—Танфильев Г. И. (1922). География России, Украины и прилегающих к ним с запада территорий в пределах России 1914 г., ч. 1, вып. 1. Одесса.—Трофимук А. А. (1950). Нефтеносность палеозоя Башкирии. Гостоптехиздат.—Фотиади Э. Э. (1947). К вопросу о строении докембрийского складчатого основания Русской платформы. ДАН СССР, т. 57, № 8.—Хаин В. Е. (1951). Некоторые общие закономерности развития платформ. ДАН СССР, т. 81, № 2.—Хаин В. Е. (1953). Новые данные по геологии Предкавказья и их значение для геологии Кавказа. ДАН СССР, т. 90, № 2.—Чибрикова Е. В. (1951). К вопросу о связи Керенско-Чембарский дислокаций с Саратовскими. Уч. зап. Саратовск. гос. ун-в., т. XXIII, геол.—Шатский Н. С. (1945). Очерки тектоники Волго-Уральской нефтеносной области и смежной части Южного Урала. Матер. по геологии СССР, вып. 8, изд. МОИП.—Шатский Н. С. (1946). Основные черты строения и развития Восточно-Европейской платформы. Изв. АН СССР, сер. геол., 1.—Шатский Н. С. (1948). О глубоких дислокациях, охватывающих и платформы и складчатые области (Поволжье и Кавказ). Изв. АН СССР, сер. геол., 5.—Шафиро Я. И. (1955). Новые данные по тектонике междуречья Терсы, Бузулука и Медведицы. Изв. АН СССР, сер. геол., 3.—Шульга П. Я. (1952). Схема стратиграфии палеозоя юго-западной части Русской платформы (Волынь и Подолья). Геол. журнал АН УРСР, т. XII, вып. 4.—Щерик Е. А. (1954). Тектоническое строение северо-западного Предкавказья и Прикубанской низменности в свете новых данных. Тр. ВНИГНИ, вып. IV.—Эдельштейн Я. С. (1947). Основы геоморфологии. Гостеоиздат.—Davis W. M. (1924). Die erklärende Beschreibung der Landformen.—Pawłowski St. (1911). Zjawiska erozji na północnej krawędzi podolskiej. Lwow.—Penck W. (1924). Die morphologische Analyse. Stuttgart.—Smolenski J. (1910). O powstaniu północnej krawędzi podolskiej i o roli morfologicznej młodych ruchów Podola. Rozprawy Akademii Umiejętności, Kraków.—Teisseyre W. (1893). Grzbiet Gologorsko-Krzemieniecki jako zjawisko orotektoniczne. Kosmos, XVIII.—Teisseyre W. (1894). Paleomorfologia Podola. Sprawozdanie Komisji fizjograficznej, XXIX.—Zierhoffer A. (1927). Północna krawędź Podola w świetle rzeźby powierzchni kredowej. Prace geograficzne, zesz. IX.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . Х
Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К О Е О Б Щ Е С Т В О С О Ю З А С С Р

В. В. ЛАМАКИН

ТАНХОЙСКИЙ БЕРЕГ БАЙКАЛА

В 1954 и 1955 гг. мне удалось обследовать южный берег Байкала, где он образован равниной, протянувшейся в обе стороны от Танхой. Мои наблюдения были кратковременными. Тем не менее они все же разъясняют некоторые вопросы об особенностях южного берега Байкала. Это относится главным образом: 1) к выделению Танхойского участка берега из остального протяжения береговой полосы озера, 2) к выяснению пространства моренных отложений максимального и постмаксимального оледенений, 3) к определению характера неотектоники берега и его современной подвижности.

По южному берегу Байкала, на участке длиной приблизительно 100 км, от устья р. Мурина и до ручья Крестовки (в 10 км восточнее р. Мишихи), вдоль подножья Хамар-Дабана тянется предгорная равнина. Ширина ее достигает 10—12 км, местами, как например с восточной стороны р. Переемной, 4—5 км. Поверхность равнины наклонена от горного подножья к берегу и пересекается в этом направлении большим количеством рек и ручьев. По р. Снежной и рядом текущей Осиновке наклон равнины очень пологий, так что даже на своей закраине возле гор она достигает высоты всего в несколько десятков метров над Байкалом. В районе Танхой равнина отличается крупной всхолмленностью и возвышается более чем на 200 м. Менее резко всхолмлена равнина по обеим сторонам р. Выдриной, протекающей между рр. Переемной и Осиновкой. С восточной стороны р. Мишихи поверхность равнины образует поперечный уступ, который резко возвышается над соседней частью, расположенной по другую сторону реки. Над уступом находится IV древнебайкальская терраса, обладающая здесь большой шириной. Ее плоская поверхность полого, но высоко поднимается на расстоянии 6 км к подножью гор, возле которых достигает высоты 120 м (по данным топографических карт). Соответственно повышается и обрыв террасы над р. Мишихой. Перед Байкалом терраса обрывается со сравнительно небольшой высоты.

Равнинные берега представляют редкое явление на Байкале. Поэтому предгорная равнина между рр. Мурином и Мишихой издавна обращает на себя внимание многих исследователей. И. Д. Черский, оставивший наиболее подробное описание берегов Байкала, выделил эту равнину под наименованием Муринско-Мишихинской «площади». Название это было связано с названиями рек, ограничивающих равнину или «площадь». В настоящее время эту площадь ради большей краткости и точности можно назвать Танхойской равниной по имени крупного населенного пункта Танхой, который находится посредине равнины. Соответственно с этим

берег, образованный Танхойской равниной, следует называть Танхойским берегом.

По северной стороне Хамар-Дабана, над Танхойской равниной, протягивается зазубренный гребень Снежинских гольцов (название, употреб-



Рис. 1 Гора Обручева.

лявшееся Черским). Этот горный хребет расположен в широтном направлении — от верховья р. Лангатуя, являющейся правым притоком р. Мурина (от перевала «Лангатуйские ворота») к востоку на расстояние 90 км до верховьев р. Мишихи: из горных вершин, которые видны с Байкала,

в нем выделяются голец Сохор над верховьем р. Переемной высотой 2323 м и гора Обручева (рис. 1) высотой около 2200 м над уровнем океана (соответственно 1870 и 1750 м над Байкалом). К востоку от Мишихи Хамар-Дабан снижается и утрачивает характер гольцового нагорья. Здесь зазубренные гребни отсутствуют; вершины уплощаются, и даже самые высокие из них обросли лесом.

Танхойская равнина покрыта четвертичными ледниковыми, озерными и речными отложениями; близ берега существуют мелкие озера. Ледниковые отложения распространены в средней части протяжения равнины, а озерно-байкальские слагают особенно большие площади в обеих оконечностях равнины, где они высоко подняты. В более восточной части равнины, по-видимому начиная с р. Выдриной, из-под четвертичной толщи выступают на поверхность третичные байкальские отложения, которые в районе Танхой и Мишихи содержат прослои бурого угля.

Третичная толща на южном берегу Байкала была обстоятельно исследована И. Д. Черским, А. В. Арсентьевым, В. К. Яковлевым, Г. Е. Рябухиным и другими геологами. Рябухин применял глубокое бурение. Часть полученных сведений вошла в «Геологию Сибири» В. А. Обручева (т. III, 1938, стр. 1169—1171). Возраст третичных отложений определяется неогеном. Однако, согласно новейшим пылевым данным, низы этой толщи, возможно, принадлежат к концу олигоцена. По наблюдениям А. В. Арсентьева (1924), третичные отложения залегают по р. Переемной до высоты 360—380 м над уровнем Байкала; ¹ вероятно, они несколько поднимаются здесь на горное подножье.

Четвертичные образования целостно, т. е. как система, до сих пор были исследованы на берегах Байкала и, в частности, на Танхойской равнине только И. Д. Черским и В. К. Яковлевым.

Черский дал подробное и точное их описание преимущественно в литологическом отношении, большей частью правильно различая их по происхождению. Впрочем, из четвертичных образований он выделял только речные и озерные. По возрасту четвертичная толща разделена Черским на «постплиоценовые» и «новейшие» образования. К «новейшим» отнесены те отложения, которые образуют молодые участки местности. Четвертичные отложения наряду с другими породами показаны Черским и на карте береговой полосы Байкала. Танхойский берег исследован в 1877 г. (Черский, 1878, 1886 и 1889).

Главная ошибка в описании Черским четвертичной толщи на берегах Байкала заключается в отнесении им моренных образований к третичным озерным отложениям или, в других случаях, к четвертичным озерным отложениям и отложениям горных потоков. На Танхойской равнине, где Черский впервые на побережье Байкала встретился с моренами, он выделил их в верхний ярус развитых здесь же третичных образований под названием «конгломераты с прослойками песчаника». Поводом к этому послужило непосредственное налегание морен на древнебайкальские отложения с бурым углем, возраст которых определялся по растительным остаткам. Причина же коренилась в предвзятом мнении Черского о слишком ограниченном распространении древних ледников в Сибири.

При дальнейших исследованиях Черский относил к «верхнему ярусу» третичных озерных отложений и большинство тех морен, которые он встречал на берегах северной части Байкала.

¹ Большая часть результатов исследования третичных угленосных отложений на южном берегу Байкала была опубликована А. В. Арсентьевым ранее (1922).

Отмечая ошибку Черского в отношении морен на берегах Байкала, следует указать, что она не помешала ему весьма точно описать их как особые горные породы и нанести на геологическую карту.

В. К. Яковлев разделял «дилювиальный», т. е. плейстоценовый, «нанос» на два горизонта. Нижний, по его описанию, «представляет отложение валунов, иногда распределенных довольно равномерно в массе наноса, иногда в виде местных скоплений». Эта общая характеристика дополнялась указанием, что местами «валуны лежат на поверхности, образуя подобия ледниковых каменных полей». Однако ледниковые отложения как таковые не выделялись. Верхний горизонт состоит из галечника и булыжника. Существующие речные долины выполнены «новейшими аллювиальными наносами». По берегу Байкала Яковлев описывал «прибойное отложение из песка, галек и валунов». На низменных площадях отмечены торфяники. На склонах гор описывался «элювиальный нанос» из остроугольных обломков (В. К. Яковлев, 1904).

На развитие морен на южном берегу Байкала впервые указал К. Кейльгак (Keilhack, 1914). По его описанию, морены особенно хорошо выражены в районе Танхой. Это подтверждено современными исследованиями. Наряду с этим часть соображений Кейльгака о ледниковом происхождении валунных отложений на других участках того же берега оказалась ошибочной.

Берег Байкала в районе устья Мишихи. Прибрежная равнина с правой стороны р. Мишихи, как уже отмечено, возвышается крутым уступом над более западной частью Танхойского берега, расположенной по левую сторону реки. Справа от Мишихи равнина образована IV древней террасой Байкала, которая в этом месте очень высоко поднята над поверхностью озера. Из соотношения с моренами в нижнем течении р. Снежной и на северных берегах Байкала видно, что IV терраса образовалась в промежуток времени от начала отступления ледников максимального оледенения до развития постмаксимального оледенения. Там, где существуют морены обоих оледенений, IV терраса врезана в морену максимального оледенения, но отсутствует в береговых склонах, сложенных мореной постмаксимального оледенения.

Плоская поверхность IV террасы справа от устья Мишихи находится у своей бровки на высоте 40 м над уровнем Байкала. Отсюда она равномерно повышается к горам, т. е. на юг, на расстоянии приблизительно 5 км. У подножья гор терраса достигает высоты 120 м над Байкалом. Такой наклон террасы не может являться первичным. Вероятно, окраина террасы тектонически поднята больше, чем ее внешняя полоса у бровки.

Описываемая IV терраса срезает третичные слои, составляющие ее цоколь и обладающие юго-восточным, т. е. противоположным, наклоном, по крайней мере возле края террасы над Байкалом. Какая толща пород срезана после образования в них наклона к юго-востоку, остается неизвестным. Из соотношения между наклоном террасы и падением третичных пород вытекает только, что Байкал при участии впадающих в него рек срезал отложенную им ранее и сильно покоробленную при тектоническом поднятии толщу осадков.

В обнажении под бровкой террасы на правой стороне устья Мишихи к собственно террасовым четвертичным отложениям относятся поверхностный слой тонкослоистой супеси мощностью в 3 м и залегающая под ним галечная линза мощностью 2 м, которая вложена в подстилающую третичную толщу (рис. 2). Последняя состоит в этом месте из слоев песка

и глины с бурым углем, которые наклонены на юго-восток под углом 10° . Четвертичные отложения, образующие поверхность террасы, возможно, увеличиваются в мощности по мере приближения к горному склону.

Падение на юго-восток третичных отложений возле устья р. Минихи представляет местное явление. Как известно, свита этих отложений имеет в общем наклон к озеру, т. е. к северу, что впервые выяснилось из наблюдений Черского. Только местами мономинальное залегание свиты осложнено небольшими второстепенными деформациями в виде поднятий



Рис. 2. Бровка и верхняя часть разреза IV древнебайкальской террасы с восточной стороны устья р. Минихи.

и односторонних выступов антиклиналеобразной формы; существуют также разрывы. Такие местные деформации описаны наряду с общим наклоном слоев к озеру В. К. Яковлевым (1904) и Г. Е. Рябухиным (1934, 1935).

В. К. Яковлев, подытоживая свои наблюдения над тектоникой третичной толщи на южном берегу Байкала, писал, что эта толща образует «систему пологих складок», почти всюду наклонных к Байкалу. По его мнению, на участках распространения третичных пород «конфигурация берега обуславливается, до известной степени, этими наклонными складками»; по осям синклиналей расположены «русла потоков, впадающих в Байкал». Кроме того, из несогласия в залегании третичных и четвертичных отложений он заключил, что осушенные третичные отложения подверглись изменению в положении (местные поднятия или опускания) и образовали ряд складок перед наступлением трансгрессирующего Байкала. Несомненно, что эти складки имеют идиоморфный характер.

Мои наблюдения вокруг всего Байкала показывают, что развитие таких отдельных небольших складкообразных поднятий и выступов горного склона происходило во многих местах и в четвертичный период. Оно про-

должается и теперь. Четвертичные структуры определяются по деформациям древних четвертичных террас и волноприбойных линий Байкала, а также по проявлениям современных движений берегов озера. Амплитуда тектоники в четвертичных образованиях меньше, чем в третичных, соответственно с разной продолжительностью развития тех и других.

Преобладающий наклон третичной толщи в сторону Байкала вызван изгибной тектоникой, а именно вспучиванием Хамар-Дабана с прогибанием Байкальской впадины, которые осложняются только отдельными разрывами сравнительно небольшого протяжения (Ламакин, 1935, 1952).



Рис. 3. Берег Байкала западнее р. Мишихи.

Обратные наклоны слоев представляют частные явления. Местами на их возникновение, кроме внутренних тектонических причин, могло повлиять неравномерное уплотнение разнообразных по составу отложений под давлением вышележащих слоев и соскальзывание одних слоев по другим в связи с их общим наклоном в сторону озерной впадины. Присутствие среди третичных отложений довольно мощных слоев глин делает это предположение весьма вероятным.

IV терраса в районе р. Мишихи достигает очень большой высоты. Вместе с этой террасой очень высоко подняты у Мишихи и третичные байкальские отложения. У рр. Переемной и Выдриной третичные породы залегают высоко в отдалении от берега, а близ него спускаются низко над Байкалом, и их разрушенная поверхность не срезается террасой, а покрыта мореной и позднейшими речными отложениями. Последние образуют по течению рек узкие террасы, вытянутые в поперечном направлении к берегу. По р. Снежной третичные отложения вовсе не выходят на

поверхность и залегают, по-видимому, на значительной глубине ниже дна долины. Таким образом, вдоль Танхойского берега происходит постепенное опускание кровли третичных пород с востока на запад.

В 10 км к северо-востоку, т. е. вправо от устья р. Мишихи IV древнебайкальская терраса выклинивается, так как к берегу подступает в виде горы Ковриги склон Хамар-Дабана, сложенный кристаллическими породами.

По левой стороне устья р. Мишихи на большой площади расположена III древнебайкальская терраса. Ее бровка над береговым обрывом к западу от устья расположена на высоте всего 10 м над Байкалом. В глубину берега поверхность III террасы полого повышается. Она сложена валунно-галечным и песчаным материалом. В береговом обрыве террасовая толща спускается под уровень воды в озере.

Поверхность террасы ровная, почти плоская. На ней разбросаны редкие крупные валуны размером до 60—80 см в поперечнике. Многие из них несколько угловаты. Местами на поверхности террасы заметны мел-

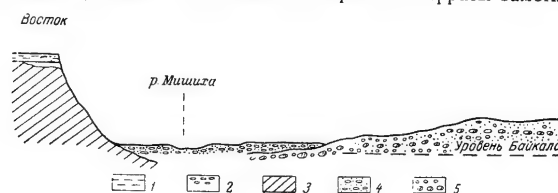


Рис. 4. Геологический разрез берега Байкала возле устья р. Мишихи.

1—Поверхностный слой супеси на IV древнебайкальской террасе на правой стороне устья р. Мишихи, 2—галечная линза, 3—третичные отложения с бурым углем, 4—речные отложения, 5—валуно-галечные отложения с разнозернистым песком, составляющие III древнебайкальскую террасу.

кие и широкие ложбинки, слабо оформленные, вытянутые по направлению к Байкалу. Прибой подмывает террасу, и поэтому под ее обрывом (со ступенькой II древнеозерной террасы, высотой 8 м у волноприбойной линии) берег сложен крупной галькой и валунами. Много валунов лежит и в воде у берега. Некоторые из них достигают 1—1 $\frac{1}{4}$ м в поперечнике. В этом месте коренные кристаллические породы подступают к поверхности (рис. 3).

Долина р. Мишихи близ устья врезана по границе распространения IV и III древнебайкальских террас. В долине на высотах 3.5 и 2 м над рекой, на левом берегу возле устья, находятся две речные террасы, состоящие из плоских и широких валов, чередующихся с такими же широкими и мелкими ложбинами. Валы направлены параллельно течению современной речки. Террасы сложены с самой поверхности галечным наносом. Валунов на них нет. Поверхностный песчаный или мелкогалечный слой тоже отсутствует. Галечник образует непосредственно поверхность террас. Это — аллювий горной реки.

Вверх по течению реки, на наибольшем расстоянии от берега Байкала, обе низкие древние террасы соединяются в одну общую поверхность, которая имеет высоту 3 м над уровнем р. Мишихи (рис. 4).

С левой стороны устья р. Мишихи II древнебайкальская терраса непрерывно сопровождает берег в направлении к соседней губе, где находится островок Ялик; она не прерывается даже на выступающей в озеро

тупой и широкой оконечности мыса перед этой губой, в $2\frac{1}{2}$ —3 км от р. Мишихи. На мысу волноприбойная линия на закраине II террасы обозначена полоской мелких валунов, вымытых волнами из толщи III террасы, на указанной ранее высоте в 8 м над Байкалом. Здесь ширина II террасы всего 20 м. Далее она расширяется. По наблюдениям В. К. Яковлева, древнебайкальские террасы очень хорошо выражены в количестве трех между речками Западной или Малой Язовкой и Парной, т. е. в Ялицкой губе. Впрочем неизвестно, действительно ли все террасы, отмеченные здесь Яковлевым, образованы Байкалом.

По другую сторону устья р. Мишихи, т. е. к востоку от него, тоже существует II древнебайкальская терраса. Здесь она составляет подножие высокой IV террасы и прислонена к ее цоколю из третичных пород. Ширина поверхности II террасы, состоящей из песка, равна 30—40 м; волноприбойная линия ее находится на высоте 10 м. Большая высота террасы с восточной стороны Мишихи, чем с западной, показывает на увеличение амплитуды поднятия берега к востоку. Окаймляя оконечность мыса

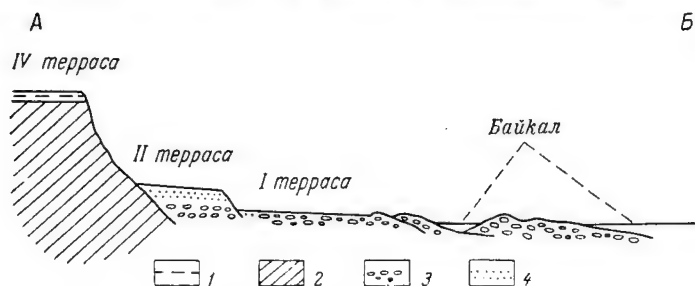


Рис. 5. Разрез берега Байкала восточнее дельты Мишихи (по линии А—Б на рис. 6).

1 — четвертичная супесь на IV древнебайкальской террасе, 2 — третичные породы с бурым углем, 3 — гальки в байкальских отложениях, 4 — песок в байкальских отложениях.

с восточной стороны Мишихи, II терраса протягивается далее к речке Болванихе. На восточной стороне мыса, под 10-метровой террасой, расположена еще более низкая и узкая I древняя терраса высотой всего 3.5 м.

В этом же месте, у самого берега, протянулись два плоских и широких галечных вала, намытых прибоем и заросших редкими деревьями. При этом задний от берега вал приподнят выше над уровнем озера, чем передний. Валы разделены сравнительно широкой и длинной ложбиной, которая залита водой и превращена в озеро. Высота заднего вала 3 м, а переднего 2.5 м. Задний вал и расположенная над ним узкая I древняя терраска разделены небольшой ложбинкой (рис. 5). Таковы здесь несомненные признаки современного поднятия берега, которое составляет продолжение тех этапов его поднятия, которые образовали древние террасы.

В соответствии с поднятием берега Байкала при впадении в него Мишихи у этой реки развита приустьевая зачаточная дельта. Поверхностная дельта Мишихи выдвинулась в озеро приблизительно на 0.5 км (по данным Атласа Ф. К. Дриженко). Ее ширина по береговой линии равна 1.5 км. Дельта прослеживается и под водой (рис. 6).

Поднимающаяся дельта Мишихи отличается тем, что ее низменная периферическая полоса окаймлена не одним простым свежим валом, как это бывает на опускающихся дельтах, а широким валом, который образовался в течение длительного времени в результате присоединения при-

бойного наноса. Задняя сторона вала зарастает лесом. Широкие береговые валы на поднимающихся берегах образуются и из слияния двух или нескольких соседних элементарных валов, у которых сохраняются обособленные гребни.

На низменной поверхности Мишихинской дельты, сзади берегового вала, много старых протоков реки, которые превратились в озера.

Поднятие байкальского берега, описанное возле устья р. Мишихи, прослеживается к северо-востоку. У речек, впадающих на этом участке в Байкал, существуют дельты. Хорошо развиты древне-байкальские террасы.

Берег возле устья р. Переемной. Морены на южном берегу Байкала, в районе Танхой, были указаны еще более 40 лет назад К. Кейльгаком

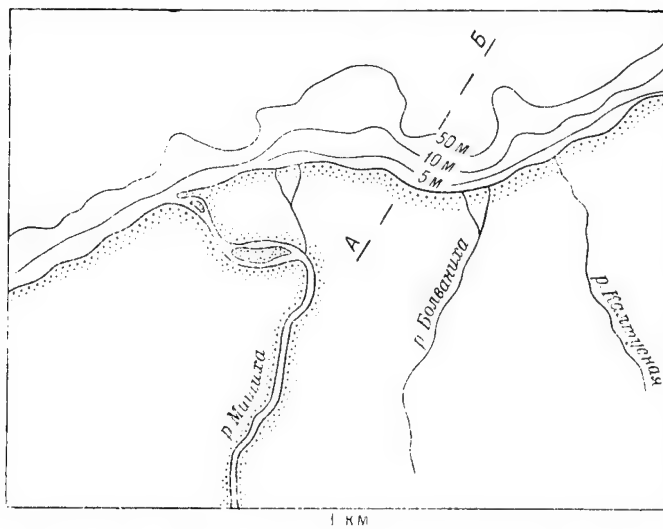


Рис. 6. Дельта р. Мишихи. (По данным Атласа Ф. К. Дриженко).

(Keilhack, 1914). Они развиты в этом месте особенно мощно. С левой стороны устья р. Переемной типично выраженную морену я наблюдал в 1948 г. (Ламакин, 1950, 1952). Недалеко от берега морена с валунами на поверхности обладает мелкохолмистым рельефом с относительным превышением холмов до 5 м. Между холмами расположены небольшие, частью заболоченные котловины. В хороших разрезах видно, что морена состоит из типичной несортированной серой супеси, содержащей большое количество валунов, гальки и щебня. Размеры валунов до 3 м в поперечнике. Морена залегает непосредственно на третичных отложениях с бурым углем. Высота моренной равнины близ берега до 20—25 м над Байкалом.

Мои наблюдения в районе Танхой в 1954 г. показали, что морена распространена с левой стороны р. Переемной, т. е. к западу вдоль берега Байкала на сравнительно большом пространстве. Поселок Танхой расположен по склону больших моренных нагромождений. С востока и юга над ним поднимается описанная моренная площадь по левую сторону р. Переемной. Всюду на склонах и в котловинах много разных валунов. Во многих местах морена обнажается в искусственных выемках. Она занимает пространство между р. Переемной и речкой Безголовкой, или

Куркавкой, и распространяется несколько далее на запад, к речке Основке (Танхойской Осиновке).

Ближе к горному подножью расположена высокая равнина, сложенная третичными породами. Она прорезается долиной р. Переемной. По этой долине ледник, спустившийся с гор, достигал Байкала.

Справа от дельты Безголовки, впадающей в Байкал в пос. Танхой, прибой подмывает древнюю неширокую ее террасу. Бровка террасы имеет здесь незначительную высоту — всего 3 м над устьем речки. С удалением от берега терраса возрастает по высоте, повышаясь в глубь берега круче, чем речка. Терраса сложена слоистым грубозернистым песком с гальками и редкими мелкими валунами. Цвет песка серый. Эти отложения составляют террасу с самой поверхности. На глубине 2 м в выемке обнажены более древние породы — бурый песчаник и конгломерат. Подойдя к Байкалу, терраса обрывается его берегом. Морена залегает сравнительно глубоко под террасовым галечным песком; на береговом пляже под бровкой террасы валунов нет.

С левой стороны Куркавки, близ устья, узкая речная терраса из галечных отложений с песком имеет высоту 5 м. В ее сложении здесь участвует свежий конгломерат, рыхлый и ржавого цвета. Терраса выходит к берегу Байкала. На пляже под ее бровкой из-под галечных отложений выглядывают два валуна. Один из них имеет 2.5 м в поперечнике и остроугольные очертания. Размеры другого меньше, но он также мало окатан. Крупные размеры валунов и их остроугольные формы свидетельствуют о том, что валуны не окатывались сколько-нибудь значительно речкой. Не речка принесла их на берег Байкала, а древний ледник. Это — валуны из размытой морены, кровля которой находится здесь, по-видимому, на уровне Байкала. На расстоянии около 1 км от Байкала террасы Безголовки намного сужаются и возвышаются до 7—8 м над речкой, которая течет в каменистом валунно-галечном русле. По сторонам русла — узкая пойма, слабо оформленная, из таких же валунов и галек, как и русло. Еще далее от берега террасы с обеих сторон Безголовки выклиниваются.

Приуроченность террас к речке, их крупногалечный состав с самой поверхности, отсутствие песчаного или хотя бы мелкогалечного покровного слоя сверху ясно показывают, что они имеют речное происхождение. Одинаковая величина слагающего материала сверху вниз по террасовой толще показывает, кроме того, что толща имеет характер аллювия горной речки.

Древнебайкальских террас, врезанных в морену, в районе Танхоя вообще нет. В моих работах (1950, 1952) было допущено ошибочное предположение, что у Танхоя, возле самого берега Байкала, в морену врезаны древнеозерные террасы с галечными отложениями. Мое ошибочное суждение о террасах в районе Танхоя основывалось на мнениях Г. Ю. Верещагина (1937) и Н. В. Думитрашко (1935, 1948 и 1952) о сплошном поднятии юго-восточного берега Байкала, образованного подножием Хамар-Дабана, и на высказывании Думитрашко (1948, 1952) о том, что в морены юго-восточного берега Байкала врезаны древние озерные террасы.

То, что берег в Танхое не поднимается, ясно видно на участке, расположенном рядом с поселком с правой стороны от устья р. Безголовки. Как уже отмечено, древняя терраса этой речки здесь не широка. Далее к северо-востоку берег сложен мореной. Последняя на небольшом расстоянии от Безголовки выдвигается в Байкал в виде низкого мыса с плоской поверхностью. Это — мыс Танхой. Он загораживает с запада губу

Танхой. Высота мыска 3.5—4 м, т. е. всего на несколько десятков сантиметров превышает соседнюю террасу Безголовки. На нем видны крупные валуны, выступающие из морены. Никаких признаков переработки морены прибоем Байкала незаметно, несмотря на незначительную высоту мыска над урезом воды в озере; на поверхности мыска нет обмытых валунов, отложенного водой песка и т. п.

От оконечности мыска отходит в Байкал полоса валунов, торчащих из воды. Это — остатки морены, размытой прибоем; раньше морена выдвигалась дальше в озеро. По боковым сторонам мыска — галечный пляж с отдельными валунами. От мыска вглубь берега моренная поверхность повышается сначала полого, а затем круто, переходя в склон моренной возвышенности, который прорезается поблизости выемкой с хорошими обнажениями.

Следствием быстрого опускания берега в Танхое является то, что такая большая и быстрая река, как Переемная, размывающая рыхлую морену в своем нижнем течении, не образует дельты при впадении в Байкал. У Переемной не только отсутствует дельта, но эта река впадает в сравнительно узкую губу, длиной 0.5 км и шириной 0.8 км, представляющую эстуарий, т. е. нижний конец речной долины, опустившийся под уровень озерных вод. Глубина в середине Переемной губы равна 48 м (по данным Атласа Байкала).

Древних террас на моренных склонах, которые поднимаются над Переемной губой, нет. Не наблюдаются они и над самым устьем р. Переемной. Ширина долины р. Переемной, т. е. аллювиального дна, возле устья достигает более 300 м. По нему река течет двумя протоками, из них левая является главной. Правая протока отличается слабым течением и немного выше устья в ней находится большой остров, заросший лесом, как и вся долина в целом (рис. 7).

Наряду с опусканием самого берега в районе устья Переемной закраина прибрежной равнины, пересекаемая этой рекой, подвергается энергичному поднятию вместе с горным склоном Хамар-Дабана. Об этом свидетельствует очень большая высота залегания третичных отложений по р. Переемной в отдалении от байкальского берега. Высокое поднятие в этом месте горного подножья, по-видимому, связано тектонически с местным выступом горного склона Хамар-Дабана, который заметно сужает у р. Переемной Танхойскую равнину.

Значительная площадь моренных возвышенностей над Танхоем, которые поднимаются с обеих сторон р. Переемной, показывает, что Переемнинский ледник, выходя на берег Байкала, растекался в большой ледниковый язык. Он покрывал подгорную равнину на значительном участке и омывался Байкалом. Свежесть моренного рельефа в районе Танхоя позволяет отнести существование этого ледника к первой фазе постмаксимального оледенения.

Большие моренные нагромождения прослеживаются по берегу Байкала на северо-восток от устья Переемной, приблизительно на 6 км до железнодорожной станции Переемная. Таким образом, Переемнинский язык на прибрежной равнине имел ширину около 8—10 км от речки Осиновки до станции Переемная.

Огромный Переемнинский ледник брал начало с гольца Сохор. Долина Переемной даже возле своего окончания, при выходе из гор, имеет форму превосходно разработанного трога, слегка видоизмененного последующей речной эрозией. Этот трог в связи с поразительной свежестью формы следует отнести к постмаксимальному оледенению. Над верхним

течением Переемной, под бровкой широко-выпуклой вершины гольца Сохор, виден огромный кар очень свежей формы. Он принадлежит, вероятно, второй фазе постмаксимального оледенения.

Сильному развитию Переемнинского ледникового языка могли благоприятствовать следующие условия: большая высота гор над долиной Переемной, большой ледосборный бассейн этой долины, наибольшее количество снега в Танхое по сравнению со всеми другими местами побережий Байкала. Малая ширина предгорной равнины в районе Танхоя благоприятствовала достижению этим ледником берега Байкала весьма широким фронтом.



Рис. 7. Долина р. Переемной вверх по течению от устья. Вдали — голец Сохор.

Несомненно, что Переемнинский ледниковый язык выдвигался в озеро на некоторое расстояние и всплывал на воде. Он имел характер ледника байкальского типа (Ламакин, 1953а).

С правой, восточной стороны устья Переемной находится Переемный мыс. Он сложен мореной и отличается большой высотой. Склон мыса над губой Переемной срезается железнодорожным откосом высотой более 12 м. В нем превосходно обнажена морена, состоящая из серого несортированного глинистого песка с большим количеством щебня, гальки, остроугольных и округлых валунов и разных других обломков и глыб. Моренное нагромождение над Переемным мысом имеет сильно всхолмленный рельеф.

До 1950 г. я допускал возможность проникновения ледников в Байкал только в эпоху максимального оледенения. Позже, исследуя берега северной части Байкала, я убедился в том, что ледники спускались в Байкал с окружающих гор и во время максимального и постмаксимального оледенений. На северо-восточном берегу озера мне удалось наблюдать распространение двух мощных морен разного возраста (1950, 1952, 1953а).

6*

Развитие очень свежей морены на больших площадях по берегу Байкала у устьев Переемной и Выдриной позволяет отнести ее к эпохе постмаксимального оледенения. Наряду с этим морена в устье Снежной, которая довольно сильно размыта и сглажена, должна быть сочтена отложением максимального оледенения. У Снежной, выше по течению, в 6 км от берега Байкала, над плоской приустьевой моренной площадью с участками залегания речных валунно-галечных отложений, резко возвышается конечная морена последующего ледника, спускавшегося с гор; она состоит из многих моренных валов, разделенных ложбинами. Поэтому по р. Снежной очень хорошо выступают различия двух морен разного возраста.

Из сказанного следует, что условия для развития постмаксимального оледенения на южном берегу Байкала были не менее благоприятными, чем в северной части озера.

За Переемным мысом расположена губа шириной около 1 км. Она вдается в берег двумя загубками. За ней — Тонкий мыс, оконечность которого состоит из скопления валунов, сохранившихся от размытой мо-

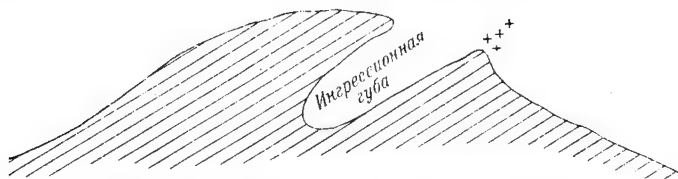


Рис. 8. Моренная ложбина, затопленная Байкалом и превращенная в губу восточнее устья Переемной. (По данным Атласа Ф. К. Дриженко.)

Крестиками обозначены отдельные валуны у берега.

рены. Сразу же с восточной стороны Тонкого мыса в берег вдается в западо-юго-западном направлении своеобразная, узкая губа очень малого размера. Ее ширина всего около 80 м, а длина 120 м (по данным Атласа Ф. К. Дриженко). Продолжением губы в берег служит глубокая моренная ложбина, которая неподалеку от озера замыкается крутыми склонами. Узкая губа представляет не что иное, как затопленную Байкалом ложбину в моренном рельефе. Она является, следовательно, ингрессионным образованием. Губа весьма живописна. От оконечности мыса, загораживающего губу с востока, протянулась в Байкал цепочка из валунов, оставшихся от размытой здесь морены (рис. 8). В пространстве между валунами крепко втиснуты внизу крупные гальки, которые не подвергаются переброскам при сильном волнении. На уровне воды между гальками пробивается трава. Заросший травой крупногалечный пляж протянулся отсюда по юго-восточному берегу губы. Очевидно, здесь волны не обладают достаточной размывающей силой, чтобы разрушить галечную броню, образовавшуюся на пляже из перлювиальных галек.

Далее от Переемной в берег вдается широкая Калтусная губа, в глубине которой, на берегу, описано обнажение третичных пород. Губа имеет в ширину около 3 км. В нее впадает речка Калтусная. В западную часть губы, ближе к Переемной, на расстоянии приблизительно 3 км по береговой линии, стекает ручеек, отмеченный И. Д. Черским под названием Неприличный. Возле устья этого ручья, в береговом обрыве, волны подмывают обнажение третичных пород высотой 7—8 м, в котором видны мелкозернистые тонкослоистые пески и песчаники, слабо цементирован-

ные, серого, желтовато-серого и красноватого цвета. Слои простираются на северо-запад при юго-западном падении под углом 10° . В отдельных слоях песок глинистый и сильно слюдистый; в одном слое заметны 3 конкреции крепкого песчаника до 30 см в длину, 20 см в ширину и 15 см



Рис. 9. Ледниковые отторженцы в Калтусной губе.

в высоту, лежащие в одной стратиграфической плоскости. В береговом склоне над обнажением залегает морена.

Перед обнажением третичных пород в воде возле берега лежат гнейсовые глыбы, наибольшая из которых упомянута Черским (1886а). Этот

огромный камень, в несколько метров длиной, как отмечал Черский, расстрескался. В настоящее время можно видеть, что северо-западная сторона камня развалилась; упавшие обломки лежат в воде, но сохраняют остроугольные очертания. Они не подверглись обточке прибоем. Следовательно, за 75 лет, отделяющих наблюдения Черского от наших, больших изменений в состоянии этого камня не произошло. Так медленно происходит размытие твердых пород на берегах Байкала.

Камни, лежащие в воде возле берега, характерны вообще для Танхойского участка побережья Байкала. На то, что они местами обильны на этом берегу, обратил внимание и отметил в описании еще А. Пушкирев в 1773 г. Моренные валуны, вымытые прибоем, различны по размерам. Это относится не только к удаленным друг от друга, но и к соседним камням. Напротив, пролювиальные валуны, особенно соседние, сходны по величине. Кроме того, многие из моренных валунов, особенно более крупные, имеют угловатые, часто даже острые формы (рис. 9).

В Калтусной губе также наблюдаются явные следы значительного опускания берега. Так, небольшой распадок ручья Неприличного продолжается под водой Байкала в виде углубления абразионной платформы на расстояние около 0.5 км от берега до края платформы, где глубина от поверхности воды равна 8—10 м. Углубление дна врезано в виде желоба в абразионную платформу приблизительно на 2 м. Подводный желоб под устьем ручья Неприличного является затопленным окончанием его долины. Склоны долины в полосе абразионной платформы, очевидно, срезаны прибоем.

Такое затопленное устье долины можно видеть и у реки Калтусной. Длина подводного желоба здесь около 1 км в связи с большой шириной в этом месте абразионной платформы; глубина желоба такая же, как и в упомянутом выше месте.

Напротив реки Калтусной, от края абразионной платформы, в сторону больших глубин, подводный узкий желоб переходит в более значительное углубление дна, которое имеет вид широко вогнутой выемки. Разница глубин по оси углубления и по его сторонам достигает 40 м. Долина реки Калтусной продолжается, таким образом, под водой и за пределы абразионной платформы, причем здесь у нее сохранились и склоны. Эта широкая подводная долина прослеживается, по Атласу Ф. К. Дриженко, до глубины 100 м (рис. 10).

Затопленные речные долины между рр. Переемной и Мишихой. В соседней губе (на северо-восток от Калтусной) подводная абразионная платформа достигает очень большой ширины (также по Атласу Ф. К. Дриженко). С правой стороны от устья реки Куркавочной, в 1.5 км от берега, глубина Байкала равна всего 10 м. Только отсюда начинается подводный склон к большим глубинам озера. В полосе абразионной платформы 5-метровые глубины находятся в 200 м от берега; на расстоянии одного километра от берега можно видеть через прозрачную воду дно озера. Оно — скальное. Выходы скал протягиваются узкими подводными ребрами в восточно-северо-восточном направлении. Они состоят, по-видимому, из более прочных разностей гнейсов. Ложбинки между скалами заполнены крупными гальками. По своему расположению ложбинки, вероятно, соответствуют сравнительно слабым прослоям в породе. Главные плоскости отдельностей на подводных ребрах наклонены к северо-западу. Скалы под водой большей частью округлены; видимо, их обточил прибой, когда они находились на урезе воды в Байкале. В такую абразионную

платформу вложено подводное устье реки Куркавочной. 10-метровая глубина в затопленной долине находится на расстоянии 0.5 км от берега, где по сторонам от нее абразионная платформа имеет глубину 5 м. На расстоянии 1 км с небольшим от берега глубина в затопленной долине равна 100 м, тогда как по обеим сторонам от нее глубины не превосходят 15—20 м.

Далее на северо-восток затопленные устья долин, судя по Атласу Ф. К. Дриженко, существуют на дне Байкала против рек Половинки, Малиновки, Ушаковки, обеих Язовок и других, менее крупных рек, впадающих в Байкал до р. Мишихи. Эта особенность байкальского дна в прибрежной полосе восточной половины Танхойского берега, начиная с р. Переемной, хорошо известна местным рыбакам.

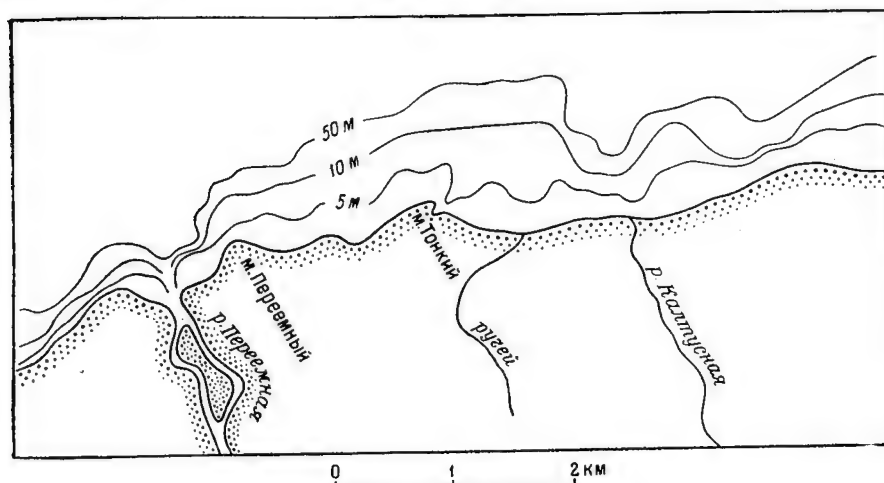


Рис. 10. Подводные долины Переемной и Калтусной. (По данным Атласа Ф. К. Дриженко).

Устья Переемной и Мишихи, которые пересекают участки байкальского берега с различными знаками движения, находятся друг от друга на расстоянии 25 км. Можно предположить, что смена знаков движений берега происходит где-то в Ялицкой губе, в которой, с одной стороны, указаны В. К. Яковлевым древние байкальские террасы, а с другой стороны, на основании данных Атласа Ф. К. Дриженко, можно предположить существование затопленного устья у р. Восточной Язовки. В связи с этим остается неясным и происхождение скалистого островка Ялик, который находится на расстоянии 350—400 м от берега. Этот остров может быть или останком наземного рельефа, сохранившимся до сих пор от абразии в полосе волноприбойной платформы, в случае опускания берега, или вновь появившимся из вод Байкала участком суши, в случае поднятия берега.

Современное опускание берега близ устья р. Переемной. Устье р. Переемной, которая впадает в глубокую губу — эстуарий, представляет участок Танхойского берега, который подвергается, по-видимому, наиболее сильному опусканию. Кроме геологических признаков большой подвижности берега, имеются и другие свидетельства, которые показывают, что опускание продолжается и теперь, и притом со значительной скоростью.

Так, по данным точных геодезических нивелировок, произведенных в разное время, Танхой опустился на 7 см между 1906—1907 и 1928 гг. Нивелировка в 1937 г. не показала, однако, смещения этого пункта по сравнению с 1928 г.; опускание в этот промежуток времени, очевидно, приостановилось (Пресняков, 1935; Верещагин, 1937; Солоненко, 1949), но затем возобновилось, судя по водомерному посту в Танхое, который опустился с 1941 до 1948 г. на 12 см. С 1949 до 1953 г. этот водомерный пост значительным смещением не подвергался. За этот срок берег, по-видимому, находился в состоянии покоя, который означает очередную остановку в опускании (Ламакин, 1956). Опускание берега в Танхое, как показывает находящийся здесь водомерный пост, может достигать временами скорости 1.5 см в год. Такая скорость является достаточной для того, чтобы опускание берега принять в расчет при постройках береговых сооружений¹. Однако иногда опускание может сменяться небольшими подвижками вверх.

Приглубость опускающегося берега и его укрепление. С быстрым опусканием берега у Танхоя и к востоку от него связана существенная особенность в устройстве абразионной платформы. Она состоит в том, что при большой своей ширине платформа во многих местах отличается значительной глубиной почти у самого уреза воды. Эта особенность проявляется главным образом в губах.

Приглубость берега способствует сильному размыванию прибоем береговых обрывов, сложенных мореной или третичными рыхлыми породами. Размыв берега здесь настолько сильный, что местами причиняет вред постройкам. Поэтому приходится прибегать к искусственному укреплению береговых откосов. Наряду с укреплением самих береговых откосов следует сообразно с упомянутой приглубостью берега позаботиться об ослаблении воздействия прибоя на откосы. На опускающихся берегах озера, в условиях их сильного размывания, не столько, может быть, надо укреплять надводную полосу берега, сколько стремиться ослабить действие прибоя в подводной полосе берега. На Байкале для этого могут быть использованы крупные валуны кристаллических пород из морены, которые следует разбрасывать в воде возле береговой линии с таким расчетом, чтобы о них разбивались волны. Верхушки камней должны достигать поверхности воды при осенних высоких ее уровнях. Как показывают современные наблюдения берегов Байкала при сравнении их с описаниями И. Д. Черского, валуны размером 0.7—1.0 м в поперечнике, лежащие в воде возле берега, обычно сохранили свое местоположение за истекшие 75 лет. По-видимому, валуны, если они достаточно крупны, могут занимать устойчивое положение и сопротивляться прибою в течение неопределенно долгого времени. Месторождения валунов весьма многочисленны непосредственно вдоль самого берега. Крупные камни для укрепления берега можно добывать и в береговых утесах.

Особенности развития максимального и постмаксимального оледенения на Танхойском берегу. Интересно, что в районе устья Переемной, по-видимому, отсутствует морена максимального оледенения. Отсутствие здесь следов этого оледенения может быть объяснено, разумеется, уничтожением их последующим оледенением. Можно представить себе, что Переемнинский ледник максимального оледенения был не меньше, а может быть даже больше, чем ледник постмаксимального оледенения, т. е.

¹ К сожалению, береговая засечка, сделанная в 1877 г. И. Д. Черским с восточной стороны устья Переемной, не сохранилась, и ее нельзя привлечь для выяснения амплитуды смещения берега на этом участке за истекшее время.

что эти ледники обладали обычным соотношением размеров. С этой точки зрения следовало бы обратить внимание на сообщения Н. В. Думитрашко (1948, стр. 117; 1952, стр. 152) о многочисленных моренных скоплениях большой мощности на побережье Байкала между Переемной и Выдриной. Здесь к Байкалу выходят долины Аносовки и других речек, которые берут начало с высокого гребня Снежинских гольцов. Может быть, моренные скопления в устьях этих долин действительно существуют и представляют остатки морен максимального оледенения. Можно допустить также, что и возвышенность на прибрежной равнине, расположенная с запада над Танхоем, за речкой Осиновкой, впадающей в Байкал в 5 км от Переемной, сложена в какой-то своей части мореной максимального оледенения.

Однако, при таких допущениях пришлось бы признать, что максимальное оледенение вообще обладало чрезвычайно огромными размерами на южном берегу Байкала. Этому противоречат довольно ограниченное распространение морены максимального оледенения по р. Снежной и полное отсутствие древнеледниковых следов в нижних течениях рр. Мишихи, Хара-Мурина, а также Утулика, который впадает в Байкал за пределами Танхойского берега.

Кроме того, морена максимального оледенения не найдена и в устье р. Выдриной, где широко распространена морена последующего оледенения. Вряд ли было бы основательно объяснять отсутствие морен максимального оледенения последующим их уничтожением одновременно в устьях двух рек, находящихся на расстоянии 25 км друг от друга. Более правдоподобно предположить, что на Танхойском берегу Байкала ледники максимального оледенения не отличались большим распространением, а Переемнинский и Выдринский ледники в эпоху максимального оледенения были даже короче ледников, которые развивались в этих же долинах при постмаксимальном оледенении. По-видимому, Переемнинский и Выдринский ледники эпохи максимального оледенения или совсем не выходили из гор на прибрежную равнину, или заканчивались сразу же по выходе на нее. Такое обратное соотношение в размерах максимального и постмаксимального оледенений в районе Переемной и Выдриной обусловлено, вероятно, недостаточно большой высотой Хамар-Дабана в верховьях этих долин в эпоху максимального оледенения.

На Танхойском берегу IV древнебайкальская терраса имеет очень большую высоту. Как указывалось, по р. Мишихе она поднимается на 120 м над Байкалом; в западном конце берега она еще выше. Следовательно, Хамар-Дабан над Танхойским берегом, т. е. на участке Снежинских гольцов, значительно повысился только перед постмаксимальным оледенением. Это сравнительно позднее поднятие Снежинских гольцов и определило местное превосходство в развитии постмаксимальных ледников в долинах Переемной и Выдриной по сравнению с предыдущими ледниками в этих же долинах. Замечательно, что на Снежной, где древние террасы ниже, существует обычное соотношение в границах двух разновременных ледников. Впрочем, и здесь максимальный ледник все же не на много превосходил в размерах последующий.

Кроме увеличения высоты Снежинских гольцов перед постмаксимальным оледенением, огромному развитию Переемнинского и Выдринского постмаксимальных ледников благоприятствовало, по всей вероятности, происшедшее в то же время улучшение условий переноса атмосферной влаги к Хамар-Дабану. Этот перенос, как известно, осуществляется пре-

имущественно северо-западными ветрами. Поэтому надо признать, что возникновение глубокой брешы в горах северо-западного берега Байкала, происшедшее при образовании истока р. Ангары в межледниковую эпоху, усилило с этого времени принос влаги на Хамар-Дабан (Ламакин, 1955).

Берег при устье р. Выдриной. Устье р. Выдриной своеобразно. На самом берегу Байкала, слева от устья, впереди больших моренных возвышенностей, находится отдельно торчащий холм высотой 10 м. Холм со стороны Байкала омывается его водами; с противоположной стороны расположено болото, отделяющее холм от более высоких моренных нагромождений внутри берега. На болоте большие валуны, указывающие, что и под ним залегает морена. Валуны здесь — это остатки от размыва морены рекой, а частью остатки от взятого отсюда грунта для железнодорожной насыпи.

Обширные площади морены близко подходят к р. Выдриной с обеих сторон даже близ устья. Слева от устья реки (над отмеченным болотом) бровка моренной возвышенности над Байкалом имеет высоту более 15 м. Рельеф морены сильно всхолмленный. Холмы и бугры принимают местами характер вытянутых в длину гребней.

Бровка моренной возвышенности справа от реки находится на высоте более 25 м над Байкалом. И здесь рельеф морены сильно взбугренный. Относительная высота узких бугров над ложбинами и котловинками достигает 5—7 м. Со стороны Байкала в склоне моренной возвышенности имеется карьер с хорошим обнажением. Морена в нем состоит из разнозернистого серого песка с преобладанием мелкой фракции с гравием, щебнем, галькой и валунами до 80 см в поперечнике. Песок пылеватый. Ни слоистости, ни вообще какой-либо сортированности в расположении материала разной крупности нет. В морене залегает один ледниковый отторженец — гранитная угловатая глыба, имеющая в поперечнике более 4 м. У подножья обнажения валяется, кроме того, несколько валунов до 1.5—2 м в поперечнике, оставшихся от более мелкого грунта, взятого из карьера для строительных целей.

Всхолмленный моренный рельеф распространяется в стороны от р. Выдриной на большие расстояния. Кроме того, он распространяется и в глубь берега, к подножью гор, т. е. по всей подгорной равнине, которая имеет здесь ширину 7 км. Широкое распространение морены при устье Выдриной с превосходно сохранившимся рельефом показывает, что она отложена огромным ледником постмаксимального оледенения, который, сползая с гор, растекался на предгорной равнине в виде широкого языка и впадал в Байкал. Это был Выдринский ледниковый язык. Морена максимального оледенения в районе р. Выдриной не наблюдалась.

Река Выдриная перед устьем врезана в морену. В русле — галька и мелкие валуны. Местами из них образовались островки, заросшие частью ивовыми кустами. Такие островки или отмели выполняют здесь роль поймы, которая по берегам реки отсутствует. По берегам видны только узкие и низкие древние террасы шириной в несколько десятков метров. Справа от реки, в поселке, древняя терраса сложена сверху чистым, хорошо отсортированным, желтым неслоистым песком. Более высоких древних террас у р. Выдриной, близ устья, не видно. Над террасой поднимается склон моренной возвышенности. На противоположном левом берегу болото с валунами имеет еще менее значительную высоту, чем терраса.

Перед самым впадением р. Выдриной в Байкал низкая терраса еще более понижается и незаметно переходит в болото на берегу озера. Ины-

ми словами, древняя терраса при выходе долины Выдриной к озеру не обрывается и не образует какого-либо уступа над прибрежным болотом. Это может указывать на поперечный перекоп прибрежной равнины: опускание берега Байкала и поднятие внутренней полосы равнины и расположенных за ней гор. Шарнир перекопа прибрежной равнины пересекает р. Выдриную близ самого устья.

Дельты река Выдриная не имеет. В 200 м от устья глубина Байкала равна 60 м (по данным Атласа Ф. К. Дриженко). Река Выдриная при впадении в Байкал подмывает отмеченный моренный холм на берегу Байкала и образовала хорошее обнажение. Глубина реки в устье такова, что позволила катеру «Черский» войти в нее и остановиться перед обнажением морены. В нем виден разнородный песок, сильно пылеватый, с большим количеством щебня и гальки и валунами до 60 см в поперечнике. Песок грубый, угловатый («жесткий» на ощупь), а валуны окатанные. Слоистости в материале нет. Часть угловатых и длинных обломков расположена вертикально или под крутыми углами к горизонтальной плоскости. На вершине холма тот же грунт, что и в обнажении.

Моренный холм в устье Выдриной был посещен Черским в 1877 г. и подробно им описан (1886 а, стр. 121—122) как «бугор», состоящий из «древнего наноса с валунами», уцелевшего здесь от размыва. На карте Черского это место берега Байкала закрашено цветом отложений горных потоков (1889 б). Черский ошибся и в определении происхождения наноса, слагающего холм, и в определении остаточного характера холма. Бугор не остался от размыва рекой, окружающей местности, а представляет первичную аккумулятивную форму моренного рельефа. То, что сзади бугра, по сообщению Черского, раньше располагалась протока Выдриной, которая впадала в Байкал слева от бугра, не противоречит действительности. Отмеченные нами валуны на болоте сзади холма являются частью следами деятельности этой протоки, размывшей поверхность морены, которая подстилает болото. Протока текла по болоту и соседней с ним низкой террасе реки. Более высоких следов речной деятельности при устье Выдриной не наблюдается. Черский неправильно определил предел их высотного расположения в 30 м, основываясь на высоте залегания валунных наносов, которые он принимал за речные отложения.

В 3 км от устья Выдриной, по левому берегу этой реки, Черский (1886 б, стр. 113—120) наблюдал под валунным наносом «рыхлый железистый песчаник» желто-бурого цвета. Песчаник тонкослоистый, мелко и крупнозернистый с гравием и мелкой галькой до 3 см в поперечнике. Слоистость наклонена к северу (вниз по реке) под углом 18°. Довольно крутой наклон слоистости вряд ли может быть первичным. По-видимому, он представляет результат позднейшего тектонического наклона слоев к Байкалу, а сама порода относится к третичной толще. Если это так, то р. Выдриная служит западной границей выходов третичных пород на поверхность Танхойской равнины. Далее к западу они неизвестны.

Особенности берега Байкала между Танхоем и устьем р. Выдриной. Берег Байкала возле устья р. Выдриной, с описанными признаками опускания, составляет непосредственное продолжение опускающегося берега в Танхое и восточнее от него. Впрочем между Танхоем и Выдриной признаки опускания берега выражены слабее, чем в устье Переемной, которое превращено в большой эстуарий. Они даже здесь слабее, чем при впадении в Байкал р. Выдриной, у которой нет дельты. В отличие от Переемной и Выдриной, на участке между ними, в устьях мелких рек находятся дельты, впрочем незначительные. Кроме речки Безголовки

(Танхойской Куркавочной), зачаточные дельты существуют у рр. Осиновки, Шестопалихи, Дулихи, Аносовки, Выдринской Осиновки. Несмотря на крохотные размеры, они часто продолжают под водой в виде коротких мысообразных выступов озерного дна, которые видны в Атласе Байкала, составленном под редакцией Ф. К. Дриженко.

Весьма замечательно то, что справа, т. е. с северо-восточной стороны, все такие подводные выступы дельт сопровождаются подводными узкими желобами, вытянутыми от речных устьев к байкальским глубинам. Подводные желоба и здесь, по всей вероятности, являются затопленными устьями речных долин.

Таким образом, на небольшом участке берега между Переемной и Выдриной речные дельты с их подводными выступами совмещаются с затопленными устьями долин. Это необычное сочетание разнообразных образований вполне допустимо при слабом опускании берега. В этом случае окончания речных долин оказываются затопленными Байкалом. Вместе с тем размывание берега прибоем не столь сильно, чтобы нацело воспрепятствовать накоплению наносов при впадении в озеро речек.

На первый взгляд может показаться непонятным, почему сохраняются под водой узкие затопленные долины, т. е. почему они не занесены дельтовыми наносами. Решить эту загадку помогает закономерное расположение затопленных долин с северо-восточной стороны подводных выступов дельт. Такое расположение этих подводных образований относительно друг друга указывает, что дельты, как правило, несколько смещены к юго-западу относительно устьев рек. Это можно объяснить тем, что поблизости от юго-западной оконечности озера преобладающее значение в переносе песчано-галечного материала вдоль берега имеют «верховики», т. е. ветры, дующие вдоль Байкала с северо-востока. Волны от этих ветров и относят речной песок и гальку от затопленных в озере устьев речных долин.

Длина берегового участка с описанной двойственностью в устройстве подводной прибрежной полосы равна 18 км — от Безголовки (Танхойской Куркавочной) до Выдринской Осиновки.

Район устья р. Снежной. Первые признаки существования древней морены в районе устья р. Снежной встречены совсем близко от берега Байкала, в нескольких сотнях метров. Здесь, среди галечного русла реки, на высоте приблизительно 1 м над уровнем озера лежит несколько очень крупных валунов. Их размеры достигают 15 м в поперечнике. Валуны остроугольные. Такие же валуны наблюдаются поодиночке вверх по течению реки. Они резко дисгармонируют с ее галечным аллювием.

На расстоянии около 2 км от берега Байкала, над правым берегом реки, протягивается древняя речная терраса. Она довольно узкая; ее высота над рекой в этом месте равна 7 м. Сзади террасы здесь появляется морена, слагающая обширную площадь по соседству с рекой. Морена постепенно повышается в сторону гор, образуя высшую ступень в рельефе над Снежной.

В 2 км от берега Байкала, на слегка бугристой поверхности морены, разбросаны валуны размерами до 1—1.5 м в поперечнике. Один из валунов имеет 2 м по длинному поперечнику и 1 м по короткому. Крупные валуны отличаются от мелких не только по величине, но и остроугольными формами.

Немного далее, в сторону гор, на моренной площади, в двух ямах глубиной по 1.5 м, хорошо видны в отвесных стенках сортированные отложения из грубого отмытого песка, галек и мелких округлых валунов.

до 40 см в поперечнике. Сверху выделяется поверхностный горизонт, лишенный валунов. Слоистость в этих отложениях грубая, неправильная, гнездообразная. Они имеют, по-видимому, флювио-гляциальное происхождение или более позднее речное происхождение. Местность здесь плоская. Это — как бы самая верхняя терраса р. Снежной. Ее высота над рекой равна 10 м.



Рис. 11. Река Снежная в 6 км от устья.

В 3,5 км от берега Байкала размеры валунов на поверхности морены с пологими склонами и плоской вершиной, высотой 24 м над р. Снежной. На поверхности холма лежат мелкие валуны. Снежная подмывает западный склон холма, и на ее берегу лежит несколько крупных валунов, до 1,5 м в поперечнике.

В 3,5 км от берега Байкала размеры валунов на поверхности морены с восточной стороны р. Снежной еще более увеличиваются. Видно несколько валунов по 3—4 м в поперечнике. Они остроугольные. Более мелкие валуны, по 60—80 см в поперечнике, лежащие здесь же, имеют округлые формы. Валун с промежуточными размерами не заметно. Поверхность морены совершенно плоская. Ее высота равна 12 м над рекой. Местами собственно моренный насос, по-видимому, перекрыт флювио-гляциальными или позднейшими речными отложениями. Это та самая верхняя терраса, которая в 2,5 км от берега имеет высоту 10 м над рекой.

В 1 км далее, на поверхности плоской морены, лежит большой угловатый валун. Его длина 3 м, ширина 2 м. Он резко выделяется среди соседних валунов, которые имеют меньшие размеры и большей частью округлы. В нижней части обрыва моренной площади к реке среди деревьев заметны отдельные валуны по 2—3 м в поперечнике.

С восточной стороны Снежной, близко от ее долины, в 3—4 км от Байкала, поднимается одинокий утес высотой около 10 м. Он находится среди плоской в этом месте прибрежной равнины и представляет местный выступ кристаллического фундамента, верхушка которого осталась не засыпанной мореной. Древний ледник срывал с утеса большие камни, которые вошли в состав прилегающей морены. Этим и объясняется большое количество содержащихся в ней валунов, отличающихся огромными размерами и остроугольными очертаниями.

В 6 км от Байкала, над плоской поверхностью сnivelированной морены, возвышается ступенеобразно морена другого характера. Поверхность ее изборождена валами, которые протягиваются с востока на запад, т. е. в поперечном направлении к течению р. Снежной. Валу возвышаются на 27—30 м над рекой. Они тянутся друг за другом в сторону гор и прослежены в этом направлении на 1 км. Снежная мчится среди огромных валунов, размывая здесь морену (рис. 11).

Описанные морены принадлежат древним Снежинским ледникам, которые в разное время спускались с Хамар-Дабана по долине Снежной и отличались большими размерами. Сnivelированная морена отложена ледником во время максимального оледенения. По выходе из гор этот ледник растекался на прибрежной равнине, образуя широкий язык, а может быть, даже щит, если с ним сливался ледник соседней долины Осиновки. Снежинский максимальный ледник впадал в Байкал, что видно по позднему возрасту речных наносов между границей распространения ледниковых валунов в дельте р. Снежной и современным берегом озера. Сnivelированный рельеф морены Снежинского ледникового языка, превращенной в широкую террасовую площадь, имеет довольно древний возраст — максимального оледенения.

Морену с хорошо сохранившимися валами у р. Снежной следует определить как конечную морену постмаксимального оледенения, его первой фазы. Ей соответствует ледниковая форма долины Снежной при выходе из гор. По сохранности ледниковой формы это — типичный трог первой фазы постмаксимального оледенения. Его широкое устье разделено на отдельные выходы двумя небольшими, почти обособленными выступами горного склона. Снежинский постмаксимальный ледник тоже образовывал предгорный язык по выходе на прибрежную равнину. Однако этот язык отличался значительно меньшими размерами по сравнению с предыдущим. Подошва конечной морены Снежинского постмаксимального ледника имеет высоту над Байкалом 25—30 м. На гребне Снежинских гольцов ясно видны с берега Байкала многочисленные кары и короткие висячие трог, принадлежащие второй фазе постмаксимального оледенения.

Развитию Снежинских ледников и во время максимального и во время постмаксимального оледенений благоприятствовало то, что они питались из ледниковых покровов, которые в период обоих оледенений лежали на широком Хангар-Ульском, или Шибетском, плоскогорье, сзади Снежинских гольцов.

Кроме моренных отложений, на Снежной очень интересны ее древние террасы, которые не протягиваются до самого устья реки, а с приближением к последнему с более верхних участков течения постепенно снижаются настолько, что погружаются под уровень современных наносов (рис. 12). Устье реки образует дельту, по которой река разделяется на несколько протоков. Две из них, средние, имеют быстрое течение и откры-

ваются в Байкал. Другие являются старыми, и концы их закрыты со стороны озера галечными валами.

В устьях открытых протоков — наносные бары. Берега устьев состоят из голых галечных отложений с песком. Это отмели, на которые во время сильных штормов накатываются волны, если вода в Байкале стоит достаточно высоко. Вверх по течению обеих протоков, метрах в 80—100 от береговой линии, над голыми отмелями обособляется песчаная пойма, заросшая лесом. Остров между двумя устьевыми протоками в своей верхней по течению части представляет собой участок поймы. Выше острова река течет в одном русле.

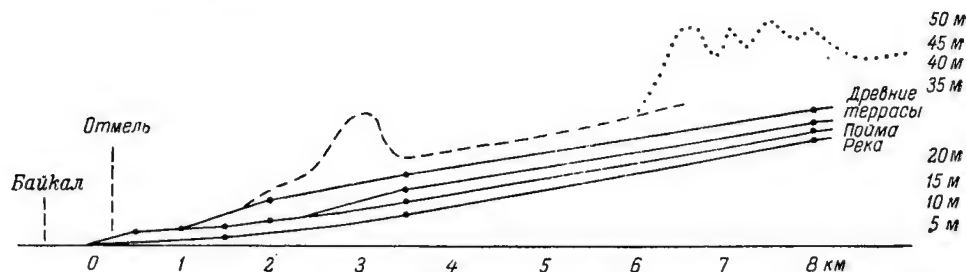


Рис. 12. Продольный профиль древних террас и поймы р. Снежной в нижнем течении.

Прерывистая линия — морена максимального оледенения, пунктирная — морена постмаксимального оледенения.

В 1 км от берега Байкала впервые над поймой Снежной появляется древняя терраса. Она постепенно повышается и в 2 км от Байкала, как уже отмечено раньше, достигает высоты 7 м над рекой. Терраса на правом берегу сложена крупной галькой с мелкими валунами. Пойма здесь высотой около 2.5 м. В 3.5 км от устья реки, в долине, существуют уже две древние террасы, не считая той, которая сложена мореной и тянется далеко на восток. Верхняя терраса имеет высоту 9 м, а в 2 км от берега — 7 м. Нижняя терраса, высотой 5 м, превышает пойму на 2 м и развита по обоим берегам реки. Ниже по течению реки 5-метровой террасы не заметно.

Выше по течению от конечной морены Снежинского постмаксимального ледника, в 8 км от берега Байкала, в русле Снежной, лежат только гальки и песок. Валунот нет совсем, в отличие от более нижних участков течения. Пойма имеет высоту 2 м, состоит из песка, а в ложбинах из мелкой гальки. Река здесь дробится на протоки. Высоты древних террас в этом месте немного меньше по сравнению с нижележащим участком реки. Нижняя терраса имеет не 5, а 3 м высоты. Верхняя терраса находится на высоте не 9, а только 7 м. Уменьшение высоты террас здесь, возможно, связано с более слабым врезанием реки зади конечной морены.

В отличие от этого, погружение древних террас Снежной под современный аллювий дельты можно объяснить увеличением тектонического наклона прибрежной равнины с течением времени. Танхойская равнина подвергается как бы перекосу, располагаясь между прогибающейся впадиной Байкала и поднимающимся Хамар-Дабаном. Шарнир перекоса, т. е. полоса, где местность сохраняет свою прежнюю высоту, протягивается, очевидно, по линии погружения древней террасы под современную дельту или поблизости от нее. Во всяком случае, шарнир перекоса не очень удален от Байкала. Поэтому дельта Снежной, немного выдвинув-

шаяся в озеро, составляет медленно опускающийся участок берега, а берег к западу и востоку от нее находится в состоянии слабого поднятия. Свидетельством опускания дельты Снежной является современный галечный береговой вал Байкала, который надвигается на низменную поверхность дельты с озерами.

По берегам устьевых протоков Снежной (рис. 13) и на береговом валу, окаймляющем ее дельту, много коряг и длинных древесных стволов (тополи, лиственницы), частью замытых рекой и прибоем и погребенных под



Рис. 13. Восточная протока в дельте р. Снежной.

песчано-галечными отложениями. На одном из лежащих стволов близ рыбацкой избушки на восточной стороне дельты вырезано ножом «1935 г.». По-видимому, все эти коряги или большинство из них принесены к берегу рекой во время сильного паводка хамар-дабанских рек в 1934 г., описанного В. А. Обручевым (1934).

К востоку от дельты Снежной, в губе Мамай, ближе к устью Осиновки, вдоль берега, протягивается широкая терраса высотой 2 м, из волноприбойных отложений, заросшая лесом. При устье Толбазихи ее ширина равна 70 м. За террасой находится не менее широкое болото. Образование этой террасы можно объяснить только достаточно длительным устойчивым положением берега, сменившимся недавно слабым поднятием. Здесь шарнир перегиба берега проходит, вероятно, под водой, но все же близ берега.

Устье небольшой речки Толбазихи подпружено волноприбойным галечником, отчего речка разлилась здесь в ширину и течет очень медленно в заболоченных берегах. Через подпрудку вода просачивается в Байкал, а частью стекает по поверхности галечного наноса небольшим ручейком.

Побережье в районе устья р. Хара-Мурина. На западной оконечности Танхойского берега прибрежная равнина образована широкими превосходно развитыми древними террасами Байкала. Особенно широка верхняя (IV) терраса. Она заходит далеко к югу вдоль правого берега р. Хара-Мурина и его притока Лангатуя, заполняя собой угол между горными склонами Хамар-Дабана с его прибрежным Муринским острогом. Ширина прибрежной равнины достигает здесь 10 км.

С правой (восточной) стороны устья р. Мурина (Хара-Мурина) над береговой галечной каргой протягивается невысокий уступ I древней террасы. Ее высота равна 5 м, а ширина местами превышает 100 м.

Сзади к террасе примыкает древний конус выносов р. Мурина с пологосклоняющейся поверхностью, которая изоборуждена русловыми ложбинами, разделенными широкими галечными валообразными повышениями. Древние рукава, отходя от реки, протягиваются к северо-востоку, т. е. вкось к общему направлению пролювиального склона. Они более или менее сохранили свои первоначальные формы. Образование этого пролювиального конуса происходило во время отложения толщи I древней террасы, когда последняя была покрыта водой Байкала. Ширина пролювиального склона равна приблизительно 1 км. В настоящее время р. Мурин, прорезав I древнюю террасу поднявшегося берега, наносит галечник современной дельты.

Над описанным пролювиальным склоном расположена широкая II древнебайкальская терраса высотой 15 м возле бровки, которая находится в 1 км от берега Байкала. Ширина террасы близ р. Мурина равна 1—1.5 км. Терраса протягивается непрерывно вдоль реки к востоку на значительное расстояние. При этом она постепенно сужается. В 4 км от р. Хара-Мурина терраса сохраняет ту же высоту (15 м) возле бровки над Байкалом. На II террасе, близ пересечения ее р. Мурином, много валунов размером до 0.5—0.6 м в поперечнике. Они принесены рекой во время накопления террасовой толщи.

В 1.5—2 км от берега Байкала горный склон Муринского отрога несколько отступает от левого берега р. Мурина, уступая место широкой III древнебайкальской террасе. Ее бровка находится на высоте 25 м над Байкалом и на высоте 15 м над уровнем прорезавшей ее реки. В подмываемом обрыве террасы над рекой вскрыты слагающие ее породы. От подошвы обрыва до высоты 12 м над рекой обнажены сортированные и ясно слоистые галечники и мелкие валунники. На них налегает ржавый разнотернистый и слоистый песок, мощностью 2—3 м, с прослоями светло-серых глин. Снизу по течению реки к этой террасе примыкает узкая I древнеречная терраса высотой 3—4 м над рекой. У самой реки вдоль берега — современный, но заросший галечник и валунник. Еще ниже по течению реки, ближе к Байкалу, на расстоянии 1 км от него, Мурин подмывает подножье Муринского отрога, и здесь на левом берегу реки, возвышается живописный гранитный утес.

Приблизительно в 3 км от Байкала, с правой стороны р. Мурина, III древнебайкальская терраса имеет высоту 30—35 м над озером. Терраса постепенно повышается вглубь берега и на своей окраине, в 5 км от Байкала, имеет высоту 60 м. На ее поверхности лежат гранитные валуны до 1 м в поперечнике. Среди валунов заметны почти не окатанные глыбы гнейса до 1.5—2 м в поперечнике. Возможно, здесь поступают к поверхности коренные скалы, которые закрыты вокруг террасовыми отложениями. Терраса протягивается вдоль берега Байкала на восток от р. Мурина и хорошо видна, например, на расстоянии 4 км от него. Здесь она сло-

жена слоистым песком с галькой и валунами, размеры которых достигают до 0.5—0.6 м в поперечнике. В яме на уступе террасы видны хорошо отмытые пески с тонкой горизонтальной слоистостью. Валуну залегают в них спорадически, не составляя сплошных слоев. Плоские и продолговатые валуны находятся в лежащем положении. Высота террасы на бровке равна здесь 36 м. В 7 км от р. Мурина, слева от речки Паньковки, поверхность той же террасы близ бровки состоит из сортированного галечника. Бровка террасы имеет ту же высоту, что и в предыдущем месте, т. е. 35—36 м.

Ширина террасы слева от Паньковки достигает 3 км. В глубь берега плоская поверхность террасы постепенно и полого повышается, достигая на окраине высоты 65 м над Байкалом. На обширной площади она покрыта сфагновым болотом, на котором растет очень много клюквы. Среди болота разбросаны озера. Повышение террасы от бровки до окраины, т. е. до древней волноприбойной линии, на расстоянии 3 км равно 30 м. К окраине терраса повышается заметнее, чем в средней ее полосе и у внешнего края.

Над III террасой, с левой стороны Паньковки, поднимается очень высокий уступ следующей, IV террасы. Он зарос густым кедровым лесом, опушка которого над сфагновым болотом подчеркивает границу III террасы. Бровка IV террасы вдоль ее уступа в этом месте отмечена среди густого леса на высоте 115 м над Байкалом. Уступ IV террасы с поверхности покрыт пластичной желто-бурой глиной, которая, судя по ее залеганию на склоне, имеет, по-видимому, делювиальное происхождение. Ее мощность — всего 30—40 см. Из-под глины в ямах глубиной до 90 см обнаруживаются гальки среднего размера, а также супесь и песок. Следовательно, терраса сложена песчано-глинистыми и галечными отложениями.

Над уступом террасы расположена более или менее плоская поверхность, слабо поднимающаяся к горам и тоже заросшая густым кедровником. IV терраса у речки Паньковки является восточным продолжением того участка этой же террасы рядом с р. Мурином, который называется Морской горой и пересекается старинным «Игумновским» трактом.

Через Морскую гору по старому тракту проследовал в 1872 г. А. Л. Чекановский (1874, стр. 393—394), возвращаясь с гольцов Хамар-Дабана на берег Байкала. Он записал, что на крутом склоне горы к Лангатую в глинистой почве содержится в изобилии крупная галька, что широкая вершина горы покрыта мощным слоем глины, а на спуске с горы к Байкалу — опять в изобилии галька. Высоту Морской горы он указывал, по измерению И. С. Полякова, равной 270 м над Байкалом (высота была преувеличена). А. Л. Чекановский считал, что материал для галечников и глины у подножий прибайкальских гор, несомненно, доставили древние ледники, но не решался определенно объяснить сам процесс образования этих отложений. Впрочем, он писал, что «более или менее мощные толщи, обилующие обточенной галькой», образовались в долинах, не исключая и Байкальской, «быть может, при сокращении глетчеров» и что глина отложилась под уровнем байкальских вод. В связи с этим Чекановский высказал мнение, в общем правильное и с современной точки зрения, что «к концу или непосредственно после ледникового периода (или в другом месте «ледниковой эпохи», — В. Л.) окрестности южной оконечности Байкала на значительное расстояние были покрыты водой», что «отступление этих вод» совершилось «быть может, вследствие медленного перемещения почвы» и что «нынешний Байкал представляет остаток этих вод».

Относительно ледниковой эпохи Чекановский тоже довольно правильно отмечал, что ее начало в Саянах и Хамар-Дабане относится к концу эпохи вулканических излияний (Чекановский, 1874, стр. 227—228 и 397—



Рис. 14. Река Лангатуй в эпигенетическом ущелье.

398). К этим соображениям А. Л. Чекановского можно добавить для уяснения только то, что ледниковая эпоха в Окологбайкалье была не одна и что отступление байкальских вод с берегов совершилось не сразу,

7*

а происходило отдельными этапами, которые запечатлелись в четырех древних террасах, связанных по своему происхождению с четырьмя этапами развития четвертичного оледенения.

Переходим к описанию Морской горы. Морская гора является IV древнебайкальской террасой. Ее крутой уступ возвышается над описанной закраиной III террасы с правой стороны р. Мурина, в 5 км от берега Байкала. Здесь закраина III террасы имеет высоту 60 м над уровнем озера. По крутому склону, представляющему уступ IV террасы, поднимается старинный тракт. В густом лесу вдоль тракта сохранилась узкая просека. Земля в просеке заросла травой, среди которой вьется летняя тропа. По ней до самой бровки крутого склона и далее на полого поднимающейся, довольно плоской поверхности террасы лежат гальки и мелкие валуны преимущественно из гранита, до 20—30 см в поперечнике. В редких случаях размеры валунов достигают 40 см. Часть валунов хорошо окатана, а некоторые являются остроугольными. Внизу склона встречаются валуны до 50 см в поперечнике.

Бровка террасы, образующей Морскую гору, находится при пересечении ее старинным трактом, на высоте 130 м над Байкалом. Средняя, возвышенная часть террасы достигает высоты 175 м над Байкалом. Тракт проходит немного в стороне, восточнее от наиболее высокого места террасы, и не поднимается на ней выше 160 м над Байкалом. В середине террасы Морской горы представляет широкую и почти плоскую равнину, которая сужается в валообразную возвышенность на мысу, ограниченном склонами к р. Муру и в сторону Байкала. У самого тракта и на склоне к Муру среди леса лежат сплеленные и полусгнившие огромные кедры.

Терраса Морской горы распространяется на юг вдоль правого берега Лангатуя до подножья горного склона, отстоящего на 10 км от берега Байкала. Восточнее она прорезается выше упоминавшейся Паньковкой, а с запада ограничивается р. Лангатуем. Долина Лангатуя глубоко врезана вдоль западной границы террасы, и эта река перед впадением в Мурин бурно течет пенящимся каскадом на высоте 50 м над Байкалом (рис. 14). Устье Лангатуя находится на расстоянии 6 км от Байкала. С левой стороны Лангатуя, напротив Морской горы, возвышается горный склон Мурина. Крутая стена отрога пересекается р. Муриным и протягивается далее на север до самого Байкала.

Интересной особенностью террасы Морской горы является то, что она заметно снижена на своей закраине близ горного склона, образуя здесь широкую и плоскую седловину между Лангатуем и Паньковкой. Таким образом, средняя, высокая часть террасы слегка обособлена в виде плоского широкого холма. Возможно, что этот холм в своем ядре состоит из коренного гранита, слагающего северо-восточную оконечность Мурина, погребенную под террасовыми отложениями. Близким залеганием гранита под поверхностью Морской горы можно, вероятно, объяснить присутствие остроугольных обломков этой породы, встречающихся среди галек и валунов, тоже гранитных, на верхней поверхности и склоне горы вдоль старинного тракта.

В то время, когда Морская гора, т. е. IV терраса Байкала, была покрыта Байкалом, рр. Мурин и Лангатуй по выходе из гор самостоятельно впадали в озеро отдельными устьями. Перед отложением IV террасы, т. е. в конце третичного и начале четвертичного времени, при достаточно высоком положении берега, Лангатуй по выходе из гор направлялся, вероятно, прямо к Байкалу по предгорной равнине и впадал в озеро при-

близительно на месте нынешнего устья Паньковки. От Паньковки хорошо видна на большое расстояние прямая долина Лангатуя, а вдали над ней огромный древнеледниковый кар, врезанный среди высоких гор Хамар-Дабана.

После отложения IV террасы и ее осушения Лангатуй, выйдя из гор, медленно протекал по низкой, в то время, прибрежной равнине. При этом вследствие извилистости русла он отклонился от прямого направления в Байкал и круто завернул влево через вышеупомянутую седловину к р. Мурина. Продолжавшееся после этого быстрое поднятие террасы вызвало усиленное врезание в нее рек, что и послужило причиной закрепления необычного поворота Лангатуя и загадочного на первый взгляд

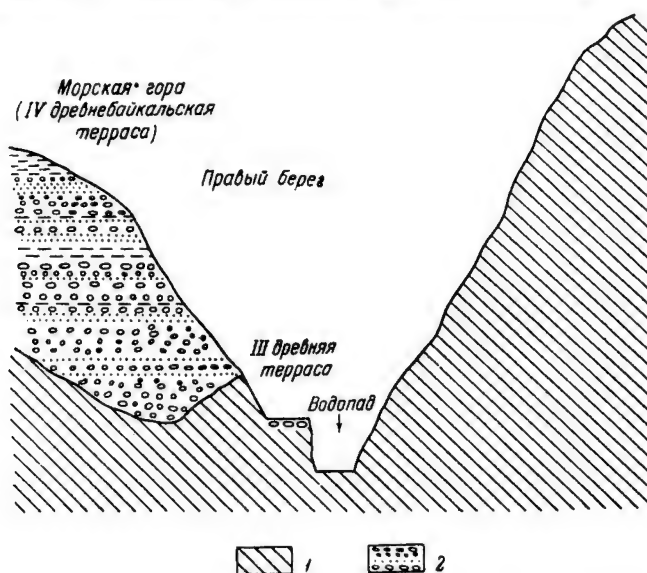


Рис. 15. Поперечный профиль ущелья долины р. Хара-Мурина у водопада.

1 — коренные кристаллические породы, 2 — террасовые отложения.

расположения его устья. Таким образом, долина Лангатуя в нижнем его течении через Морскую гору является эпигенетической. Следствием такой особенности долины можно считать не только чрезвычайно бурное течение реки перед впадением в Мурин, но и наличие скал по обоим ее берегам. Скалы не только видны в русле, но ими образованы оба берега реки до высоты 3—5 м. Сверху к ним спускаются осыпи, между которыми местами проглядывают коренные выходы гранита. На правом берегу, т. е. на обресе Морской горы, скалы поднимаются до 12—15 м.

Долина Лангатуя перед устьем — это глубокое и узкое ущелье. Оно продолжается и далее на расстоянии около 1 км вниз по течению р. Мурина, Мурин, так же как и Лангатуй, пропилив под Морской горой толщу отложений IV террасы, врезается в скалистое ложе. Гранитные скалы высотой до 5—7 м почти непрерывно вытянулись в виде «щек» по обоим берегам реки. Местами скалы выступают и посреди русла, образуя небольшие островки; кое-где возникли валунно-галечные косы. Река бурно мчится между скалами сплошной «шиверой». Над отвесными береговыми щеками круто поднимаются высокие обрывистые склоны, заросшие ле-

сом. На склоне со стороны Морской горы среди леса встречаются гальки и валуны до 40 см в поперечнике (рис. 15). Вверх от устья Лангатуя долина Мурина заметно расширяется, и по берегам реки вытягиваются полосы аллювиальных галечников.

Мурин и Лангатуй у их слияния текут на высоте приблизительно 50 м над Байкалом. Отсюда Мурин прорывается через ущелье, образуя в его начале красивый водопад высотой около 2 м, причем общее падение реки на протяжении всего короткого ущелья равно 8—10 м. Муринский водопад разделен на три струи. Центральная и правая струи разделены большой гнейсовой скалой, а левая (западная) струя отделена от центральной островком из валунного скопления. Центральная струя направлена к северо-северо-западу. С правой стороны водопада возвышается отвесный

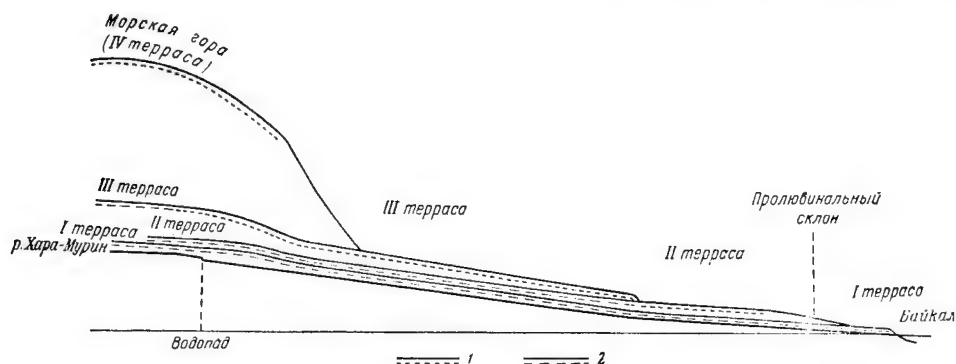


Рис. 16. Продольный профиль по р. Хара-Мурину.
1 — древнебайкальские террасы, 2 — древние террасы Хара-Мурина.

гнейсовый утес, обточенный водой. Его высота равна 30 м. Простираение гнейса — северо-восточное, падение — крутое на юго-восток. Правая струя реки бьет в утес с большой силой и, отражаясь от него, вырывается из узкого мрачного коридора, который отделен от остального русла островом из больших гнейсовых скал. По бровке утеса, на высоте 30 м над рекой, лежит слой валунов и галек, составляющий III древнебайкальскую (муринскую) террасу. Она расположена на мысу, при соединении склонов долин Мурина и Лангатуя. Ее высота над Байкалом равна в этом месте 75 м.

Ниже по течению от водопада, перед выходом реки из ущелистой долины со скалистыми берегами, древние террасы Мурина на его правом берегу имеют следующие высоты: I терраса — 7 м над рекой и 47 м над Байкалом, II терраса соответственно 10 м и 50 м, III терраса — 20 м и 60 м. III терраса является здесь вместе с тем и древнебайкальской (рис. 16).

Обращает на себя внимание резкий скачок в снижении III таррасы между участками правого берега реки у водопада и ниже водопада. Разница в высотах этой террасы над рекой достигает 15 м, а над Байкалом — 20 м. Вероятно, резкое повышение III террасы у водопада обусловлено крутым тектоническим перегибом, а может быть, и разломом прибрежной местности при ее неравномерном поднятии над Байкалом. По этой же причине здесь образовалось и ущелье с водопадом. Недавняя тектоническая деформация поверхности сказывается и в очень большой высоте

IV террасы. Деформация развивается в течение длительного времени. Стометровая разница, наблюдаемая здесь в высоте IV и III террас, является слишком большой для обычных на Байкале высотных интервалов между этими террасами. Поэтому высота Морской горы указывает, что тектонический (флексурообразный) перегиб в склоне у ее подножья возник, по крайней мере, после отложения IV террасы при начавшемся тогда общем поднятии побережья.

Этот тектонический перегиб развивается и в настоящее время, на что указывает приподнятость I древней террасы над р. Мурином в ущелистом участке долины по сравнению с выше и ниже лежащим ее протяжением. Так, на стрелке Мурина и Лангатуя, с нижней по течению стороны, I терраса, возникшая в небольшом треугольнике под прибрежными утесами, расположена на высоте 5 м над рекой. Между водопадом и выходом реки из ущелья высота этой же террасы, как уже отмечено, равна 7 м над рекой. По выходе реки из ущелья терраса снижается до 5 м над рекой, т. е. имеет здесь ту же высоту, что и на стрелке с Лангатуем.

Выйдя из щек, русло Мурина расширяется, по берегам вытягиваются галечники, развивается пойма, имеющая высоту 3 м. Склоны долины становятся здесь положе, и древние террасы расширяются. Кроме 5-метровой террасы, на нижнем участке долины существуют II и III террасы, которые здесь также много уступают в высоте соответственным террасам ущелистого участка реки. Высота II террасы ниже ущелья равна 8 м, а III террасы — 15 м над рекой. Отсюда в сторону Байкала террасы еще более снижаются. Снижение происходит постепенно, без скачков.

По левому берегу Мурина горный склон подходит вплотную к Байкалу и заворачивает на запад. Склон здесь разрезан узкой падью круто стекающей речки Шумихи. В 1.2 км от Мурина, за Шумихой, между горным склоном и берегом озера, расположена верхняя, IV древнебайкальская терраса. Бровка ее обрыва к озеру находится на высоте 30 м. В обрыве обнажаются слоистые галечные и мелкогалунные отложения. Ширина террасы около $\frac{1}{2}$ км. На закраине у волноприбойной линии она возвышается до 40 м над Байкалом. Терраса здесь значительно ниже, чем в глубине берега на Морской горе. Эта разница в высоте террасы может быть объяснена неравномерностью поднятия горного склона Хамар-Дабана.

Ближе к Байкалу поднятие отличается меньшей амплитудой по сравнению с участком побережья в удалении от берега озера. На расстоянии 6 км высота поднятия IV террасы увеличивается на 135 м, причем у Муринаского водопада поднятие этой и нижних террас возрастает резким скачком. Исходя из увеличения размаха поднятия побережья по мере удаления от Байкала, можно думать, что оно продолжает увеличиваться и в пределах гор в направлении к осевой полосе Хамар-Дабана. Если считать поднятие равномерно возрастающим, то его величина в гольцевой полосе гор, в 30 км от берега озера, будет равна 675 м за то же время, что и поднятие IV террасы (рис. 17).

Под обрывом IV террасы, на оконечности Муринаского отрога, за речкой Шумихой, расположена более узкая III терраса на высоте 18 м над Байкалом. Она сопровождает берег почти непрерывно на большом расстоянии к западу от Шумихи. В 2.5 км от Мурина замечен еще один участок IV террасы. Высота ее закраины в этом месте ниже и равна 35 м. Эта терраса сложена слоистым галечником мощностью 1.5—2 м. Под

ним — выветрелая скала. III терраса здесь тоже снижена и имеет высоту 15 м на закраине.

Далее на запад, вдоль берега, древнебайкальские террасы продолжают снижаться. В 3 км от Мурина верхняя терраса у волноприбойной линии имеет высоту 25 м, а в 4 км от него — 20 м. Наконец, в 7.5 км от Мурина заметна верхняя терраса на высоте 10 м.

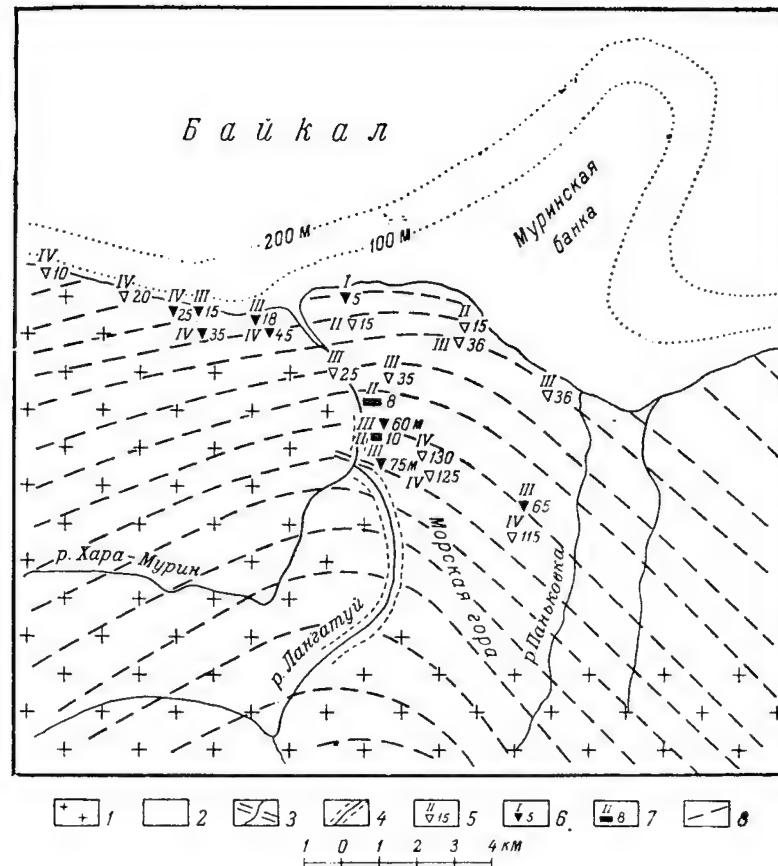


Рис. 17. Схема неотектоники в районе устья р. Хара-Мурина.

1 — коренные кристаллические породы, 2 — четвертичные байкальские и речные отложения, 3 — Муринский водопад, 4 — эпигенетические ущелья рр. Мурина (Хара-Мурина) и Лангатуя, 5 — высотные отметки древнебайкальских террас над Байкалом, 6 — высотные отметки древнебайкальских волноприбойных линий над Байкалом, 7 — высотные отметки древних террас Мурина над рекой (римские цифры — террасы, арабские — высота в м), 8 — изолинии тектонического поднятия берега.

Описанные террасы находятся на крутом горном склоне, который пересекается узкими падами. Их устья висят над Байкалом на некоторой высоте. Вдоль уреза воды прибой подтачивает местами небольшие скалы, между которыми к подножью склона спускаются осыпи, где составляющий их материал перерабатывается прибоем. Нижние древние террасы почти совсем не развиты. Особенно обрывист берег начиная с 5-го километра от р. Мурина и ближе к Осиновке, которая впадает в Байкал близ р. Солзана. Под устьями висячих падей нагромождены небольшие конусы

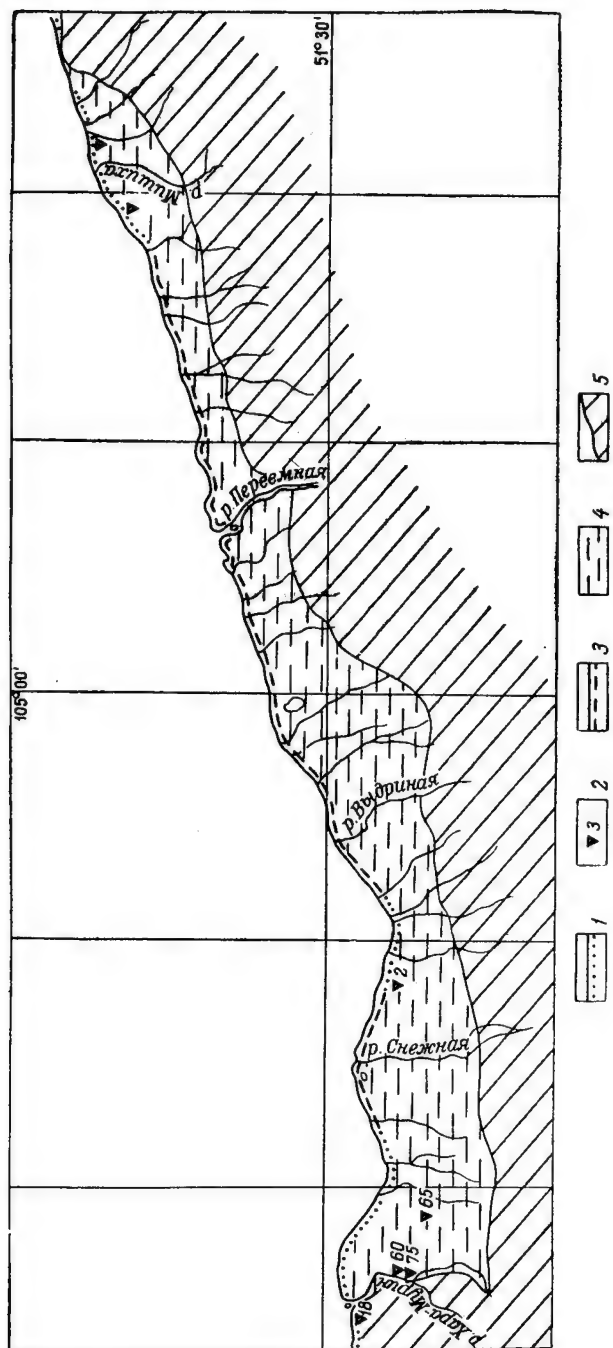


Рис. 18. Схема подвижности южного берега Байкала.

1 — поднимающийся берег, 2 — высота III древнебайкальской террасы (в м), 3 — опускающийся берег, 4 — Танхойская равнина, 5 — горный склон Хамар-Дабана. Отметки III террасы близ р. Мишихи более 10 м.

пролювиальных выносов высотой до 40 м. Галек в пролювии нет; обломки в нем имеют вид плохо окатанного щебня.

Из описанных особенностей побережья Байкала в районе устья Мурина видно, что наиболее сильное поднятие берега происходит на оконечности Муринского горного отрога рядом с устьем р. Мурина. Здесь волноприбойная линия IV террасы почти непосредственно над озером достигает высоты до 40 м. Муринский отрог, подвергающийся тектоническому поднятию, продолжается и под водой Байкала в виде известной Муринской банки, открытой Гидрографической экспедицией Ф. К. Дриженко, работавшей на Байкале в 1896—1902 гг. Муринская банка представляет широкий выступ донного склона в озере с глубинами менее 100 м, которые простираются на 10 км к северо-востоку от оконечности горного отрога. Далее этот выступ на дне Байкала прослеживается до глубины 1000 м на расстоянии 25 км от берега. Муринская банка — это тектоническое образование.

В устье Солзана с его широкой дельтой и дальше, в устье Утулика, поднятие берега происходит довольно слабо, а в Кыркидае сменяется опусканием. В пределах самого Танхойского берега поднятие ослабевает от Муринского отрога к востоку. В 15 км отсюда, в устье р. Снежной, оно сменяется слабым движением книзу. На протяжении всей средней части Танхойский берег опускается. Однако на северо-восточной его окраине поднятие возобновляется и достигает опять большой величины в районе р. Мишихи. Танхойский берег, следовательно, прогнут в середине (рис. 18).

Наряду с этим поднятие западной и восточной оконечностей Танхойской равнины сильно возрастает в своей амплитуде по направлению к горам. В наиболее прогибающейся средней части берега у р. Переемной прибрежная равнина на своей закраине у горного подножья, а вместе с тем и Хамар-Дабан подвергаются поднятию, тогда как непосредственно сам берег быстро опускается.

Из сделанного расчета тектонического наклона IV террасы в районе устья Мурина видно, что его величина поперек берега — более 20 м на 1 км. В районе Мишихи наклон террасы равен приблизительно 16 м. В общем эту величину можно принять равной 18 м на 1 км расстояния. С ним интересно сопоставить наклон поверхности третичных миоценовых отложений, который в целом приближенно оценивается 30—40 м на 1 км расстояния. Еще более древняя поверхность кристаллического фундамента под толщей третичных пород на Танхойском берегу залегает на глубине около 1500 м, считая от уровня Байкала. Поверхность того же фундамента под базальтовыми покровами на Хамар-Дабане находится на высоте в среднем 1500—1700 м над Байкалом. Амплитуда вертикальной деформации поверхности кристаллического фундамента, таким образом, равна приблизительно 3000 м на расстоянии 50 км. Тектонический наклон ее составляет, следовательно, 60 м на 1 км расстояния.

Приведенные величины размаха неотектоники за разные отрезки времени в южной части Байкала показывают, что движения земной коры, создающие Байкальскую впадину, не ослабли в четвертичный период по сравнению с третичным. Напротив, значительная деформация IV террасы за сравнительно короткий промежуток времени, охватывающий верхний плейстоцен и голоцен, позволяет думать, что подвижность земной коры усилилась за это время.

Литература

- Арсентьев А. [В.]. (1922). Прибайкальский угленосный район (ст. Кедровая — ст. Мысовая). Тр. Центр. упр. промышленных разведок, вып. 2, М.—Арсентьев А. [В.]. (1924). К вопросу о Байкальской нефти. Матер. по геол. и полезн. ископ. Дальнего Востока, № 30, Владивосток.—Верещагин Г. Ю. (1937). Современные движения земной коры в Прибайкалье в связи с вопросом о методе их наблюдения на крупных озерах. Пробл. физ. географии, т. IV, Изд. АН СССР.—Дриженко Ф. К. и др. (1908а). Атлас озера Байкал. Составлен гидрографической экспедицией под начальством полковника Дриженко. СПб. (Издан Главным гидрографическим управлением, одновременно с лодией Байкала).—Дриженко Ф. К. и др. (1908б). Лодия и физико-географический очерк озера Байкала, под ред. Ф. К. Дриженко. Изд. Главн. гидрограф. упр., СПб.—Думитрашко Н. В. (1935). Геоморфология Прибайкалья. Пробл. Бур.-Монг. АССР, т. I, Изд. АН СССР.—Думитрашко Н. В. (1948). Основные вопросы геоморфологии и палеогеографии Байкальской горной области. Тр. Инст. географии АН СССР, т. XLII.—Думитрашко Н. В. (1952). Геоморфология и палеогеография Байкальской горной области. Тр. Инст. географии АН СССР, т. LV.—Ламакин В. В. (1935). Прошлое рельефообразования в Тункинском Прибайкалье. Землеведение, т. XXXVII, вып. 1.—Ламакин В. В. (1950). Геологические и климатические факторы эволюции органического мира в Байкале. Бюлл. Ком. по изуч. четверт. периода АН СССР, № 15.—Ламакин В. В. (1952). Ушканьи острова и проблема происхождения Байкала. Под редакцией и с дополнением В. Н. Сукачева. М.—Ламакин В. В. (1953а). Байкальский тип четвертичного оледенения. Изв. Всесоюз. геогр. общ., т. 85, вып. 2.—Ламакин В. В. (1953б). Засечки Черского на берегах Байкала. Изв. Всесоюз. геогр. общ., т. 85, вып. 5.—Ламакин В. В. (1955). О происхождении Ангары. Восточно-Сибирская правда, № 15, 19 января, Иркутск.—Ламакин В. В. (1956). Подвижность берегов Байкала. Изв. Всесоюз. геогр. общ., т. 88, вып. 3.—Обручев В. А. (1934). Необычайный стиль в Хамар-Дабане. Природа, № 9.—Обручев В. А. (1938). Геология Сибири, т. III. Изд. АН СССР.—Пресняков Е. А. (1935). Геодезические аномалии в районе Байкала. Пробл. Бур.-Монг. АССР, т. I, Изд. АН СССР.—Рябухин Г. Е. (1934). К изучению Байкальского месторождения нефти. Тр. Нефт. геол.-развед. инст., сер. Б, вып. 33.—Рябухин Г. Е. (1935). Третичные отложения Прибайкалья и их нефтеносность. Пробл. Бур.-Монг. АССР, т. I, Изд. АН СССР.—Солоненко В. П. (1949). Землетрясения Восточной Сибири. Тр. Иркутск. гос. ун-в., т. III, вып. 3.—Чекановский А. Л. (1874). Геологическое исследование в Иркутской губернии. Зап. Сибирск. отдела Русск. геогр. общ., т. XI, Иркутск.—Черский И. Д. (1878). Предварительный отчет о геологических исследованиях береговой полосы озера Байкала (год первый, 1877). Изв. Вост.-Сиб. отдела Русск. геогр. общ., т. IX, № 1—2, Иркутск.—Черский И. Д. (1886а). О результатах исследования озера Байкала. Зап. Русск. геогр. общ. по общей географии, т. XV, № 3, СПб.—Черский И. Д. (1886б). Отчет о геологическом исследовании береговой полосы озера Байкала. Зап. Вост.-Сиб. отдела Русск. геогр. общ., т. XII, Иркутск.—Черский И. Д. (1889а). О результатах исследования озера Байкала. Матер. для геологии России, т. XIII, изд. СПб. минералог. общ.—Черский И. Д. (1889б). Геологическая карта береговой полосы озера Байкала. Масштаб 1:420000 (на 2 листах). Приложение к «Материалам для геологии России», т. XIII, изд. СПб. минералог. общ.—Яковлев В. К. (1904). Геологическое исследование участка Кругобайкальской железной дороги ст. Мысовая—Переемная—Култук. Геологические исследования вдоль линий Кругобайкальской железной дороги, произведенные под общим руководством профессора И. В. Мушкетова, вып. I, СПб.—Keilhack K. (1914). Naturwissenschaftliche Beobachtungen längs der Sibirischen Eisenbahn. Zeitschr. I. Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin, № 2.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . Х

Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К О Е О Б Щ Е С Т В О С О Ю З А С С Р

А. Д. КОЛБУТОВ

**О СОСТАВЕ, ОСОБЕННОСТЯХ ЗАЛЕГАНИЯ И УСЛОВИЯХ
ОБРАЗОВАНИЯ ЛЁССОВЫХ ПОРОД НА РУССКОЙ РАВНИНЕ¹****Главнейшие признаки и состав лёссовых пород**

Под термином «лёссовые породы» понимаются континентальные отложения разного происхождения, но сходного гранулометрического состава с содержанием более 50 % фракции 0.05—0.005 мм (при микроагрегатном способе подготовки образца) и с лёссовыми признаками. Среди них выделяются лёсс и лёссовидные суглинки и супеси, тесно связанные между собой постепенными и мало заметными переходами как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. При этом лёссовые и лёссовидные породы нередко слагают одни и те же формы современного рельефа.

Лёсс отличается от лёссовидных отложений большей пылеватостью, однородностью, макропористостью, повышенной карбонатностью, незначительным содержанием песчаных частиц и мало заметной слоистостью. Прослой и линзы песчано-гравийного материала встречаются чаще всего среди лёссовидных отложений. Однако и в толще лёссов можно наблюдать иногда прослой и линзы песков, гравия и гальки. Последние местами сцементированы известково-глинистым цементом в конгломерат.

Сравнительно равномерное распределение карбонатов в толще лёссов и лёссовидных отложений нередко сменяется появлением горизонтов, перенасыщенных известью, образующей неправильные скопления, гнезда, ветвящиеся инкрустированные стебельки, журавчики и налеты, а также линзы и прослой лугового мергеля. Кроме того, лёсс и лёссовидные отложения содержат гумус, рассеянный в толще или сосредоточенный в отдельных прослоях и линзах — гумусовых горизонтах. Гумусовые горизонты там, где они подстилаются сильно карбонатными лёссовыми прослоями, образуют полно выраженные ископаемые почвы черноземного, а иногда и подзолистого типа. Обычно гумусовые горизонты прослеживаются в толще лёссов Поволжья в виде прерывистых лент и не сопровождаются карбонатными горизонтами, напоминая недоразвитые делювиальные почвы склонов или аллювиальные почвы на пойме.

С ископаемыми почвами связаны ходы землероев — «кротовины», землеройки, ярусами расположенные в ряде обнажений. Эти ходы, содержащие иногда многочисленные остатки грызунов, видимо, образовались во время формирования ископаемых почв и располагаются обычно

¹ При подготовке рукописи к изданию большое значение имели замечания, а также советы М. Г. Кипиани и Н. Н. Соколова, которым автор выражает искреннюю благодарность.

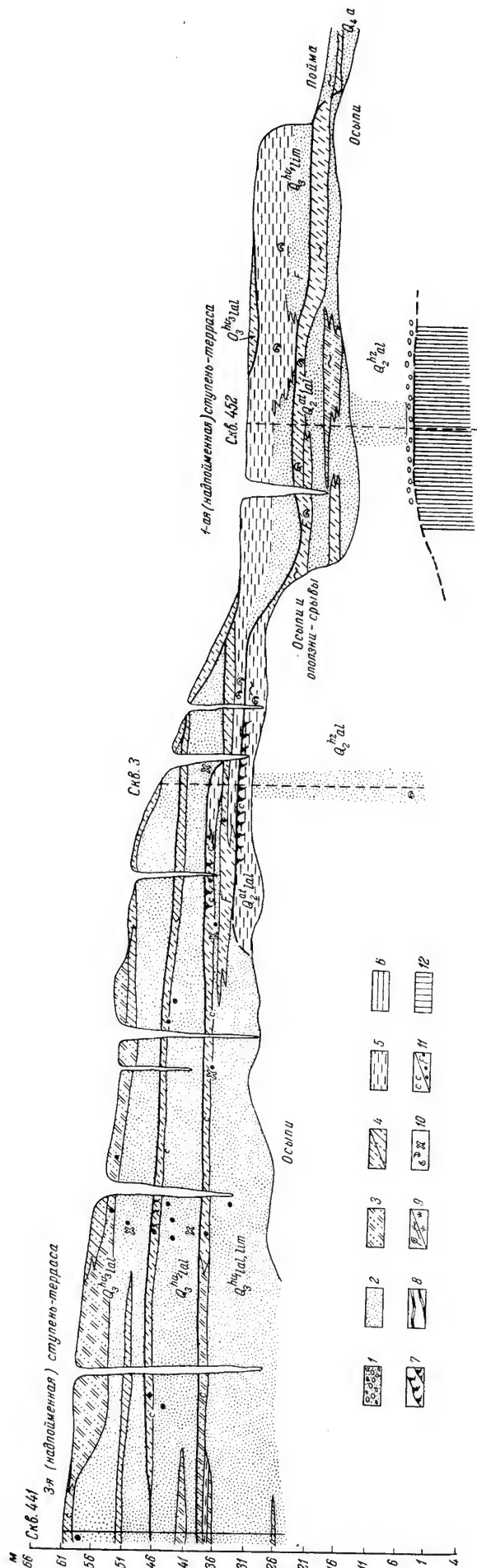


Рис. 1. Разрез правого берега р. Волги уселений Приволжье и Спасское.
Обозначения те же, что на рис. 3.

в почве и под нею, в лёссах и других подстилающих породах. Так, у селений Приволжья и Спасского на левом берегу Волги, ниже г. Сызрани, в обрыве лёссовых отложений и подстилающих их озерно-аллювиальных песков были обнаружены землероины вместе с остатками сусликов на глубинах 3—5, 10—12 и 15—18 м от современной поверхности террасы (рис. 1).

Ископаемые почвы с норами землероев встречаются часто и среди украинского лёсса, образуя иногда выдержанные горизонты на большом протяжении и разделяя лёссовую толщу на несколько ярусов.

По наличию ископаемых почв в лёссовых породах можно выделить до 3—4 ярусов, а по гумусовым горизонтам — до 5—6. Местами ярусность выражена различной окраской породы или по появлению песчаных или гравийно-галечниковых прослоев в подошве каждого яруса.

В лёссовых породах нередко находки наземных раковин и пресноводных моллюсков, кости позвоночных мамонтового комплекса и остатки растений. Лёсс и лёссовидные породы характеризуются крайне неравномерным содержанием спор и пылцы, причем по спорам и пыльце устанавливаются разнообразные растительные сообщества, среди которых преобладает травянистая растительность, в особенности влаголюбивая, как указывал В. Н. Сукачев и др.

В сухом состоянии, например в береговых обрывах, лёсс и лёссовидные отложения обладают способностью длительное время сохранять вертикальные стенки, образуя столбчатые отдельности. При смачивании они быстро размокают и дают просадки. В воде лёссовые породы, как известно, утрачивают свою связность и распадаются на отдельные частицы.

Гранулометрический состав лёссовых пород на Русской равнине довольно разнообразен, хотя для них и характерно преобладание пылеватых частиц. Так, по М. П. Лысенко (1949), истинный, элементарный состав криворожских лёссовых пород отличается высокой степенью дисперсности, преобладанием коллоидных частиц. Например, в красно-буром лёссовидном суглинке глинистые частицы составляют более половины от веса бескарбонатной массы пород.

Лёсс и лёссовидные породы на территории Украины представлены преимущественно палевыми, желтовато-палевыми, буровато-зелеными, серыми пылеватыми суглинками и супесями. Такими же литологическими разностями характеризуются лёссовые и лёссовидные отложения в Поволжье, Прикаспии и Придонье.

Минералогический состав лёссовых пород отличается однообразием. По мнению А. С. Рябченкова (1955), минералогический состав этих пород более или менее выдерживается на всей территории Украины. В то же время лёссовые породы содержат обширную ассоциацию обломочных и коллоидно-дисперсных минералов. Во всех образцах лёссовых и лёссовидных пород основное место занимают кварц, полевые шпаты, карбонаты, а среди тяжелых минералов — амфиболы, пироксены, цоизит, эпидот и непрозрачные минералы. В составе коллоидно-дисперсных минералов чаще всего встречаются иллит и кварц.

Эту особенность вещественного состава лёссовых пород наиболее четко охарактеризовал В. А. Обручев в своей рецензии на работы И. Д. Седлецкого и В. П. Ананьева следующими словами: «...где бы лёсс не образовался — в Китае, в Венгрии или Средней Азии — он получает и сохраняет вполне определенные, присущие ему специфические черты состава и облика минералов» (1955, стр 153).

Особенности строения лёссовых толщ и их связь с породами водного происхождения

Известно, что лёссовые породы залегают в различных геоморфологических условиях и представлены многочисленными разновидностями. Однако в результате изучения лёссовых пород на юге и юго-востоке Русской равнины выявляются разрезы лёссовых толщ, которые состоят из однородных пылеватых суглинков или супесей, разделенных на горизонты или ярусы то ископаемыми почвами, то линзами гравия или галечников. Местами горизонты или ярусы лёссов различаются только по цвету или по содержанию карбонатов. В пределах Высокого Заволжья и южного склона Общего сырта такие однородные лёссовые породы слагают плоскоувалистую ступенчатую равнину. Они, например, описаны Н. И. Нико-

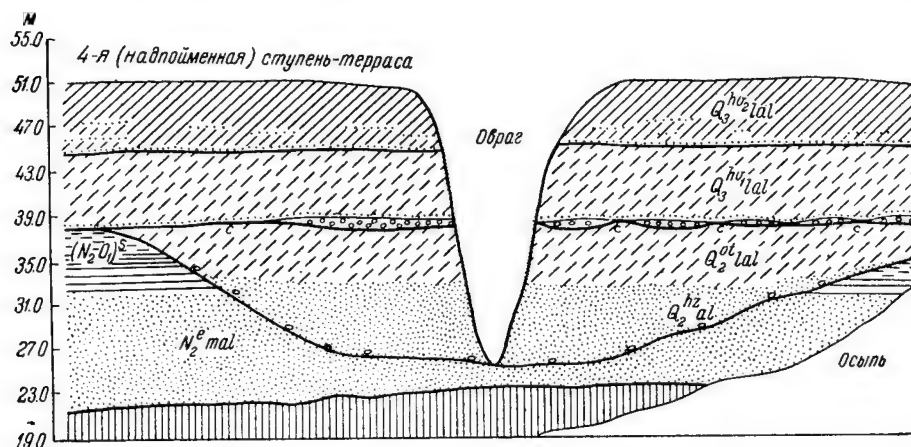


Рис. 2. Разрез лёссовой толщи 4-й надпойменной террасы по левому берегу р. Дона у хут. Кудинова.

Обозначения те же что на рис. 1.

лаевым в верховьях р. Чагры. Однообразные мощные (до 25 м) толщи пылеватых суглинков и супесей можно наблюдать по верховьям ряда глубоких оврагов на правом берегу р. Волги от г. Сызрани до г. Саратова. Лёссовые суглинки и супеси, местами прослоенные ископаемыми почвами или линзами галечников, прослеживаются по высоким вертикальным береговым обрывам Калачевско-Цимлянского Придонья (рис. 2) и Приазовья (Громов, 1948; Хохловкина, 1940). Широкое распространение имеют подобные разрезы лёссов в пределах возвышенной равнины левобережья Днепра (окрестности Полтавы и Кременчуга). При этом лёссово-суглинистые толщи с несколькими ископаемыми почвами в ледниковой зоне Приднепровья разделяются валунным суглинком (мореной) на две части: подморенную и надморенную (правый берег р. Псла).

К другому типу относятся многочисленные разрезы лёссовых пород, в которых можно наблюдать равномерное чередование прослоев однородных пылеватых суглинков и супесей с сериями слоев песков и галечников, супесей и глин явно озерно-речного (Поволжье, Придонье), лиманного (Прикаспий, Поволжье) или водно-ледникового происхождения (Прикамье, Приднепровье и др.). Эти разрезы характеризуют строение надпойменных террас рр. Волги, Дона, Днепра и других, обычно в местах,

где их долины образуют обширные озеровидные понижения. Так, в наиболее характерном обнажении третьей надпойменной террасы на Волге, у селений Приволжья и Спасского, выделяется до 4 пачек слоев, иногда распадающихся на ряд более мелких (Николаев, 1937; Грищенко и Коптев, 1955). В другом обнажении, по оврагу у дер. Сперанки на левом берегу р. Волги, в 20-метровом обрыве, насчитывается до 6 пачек переслаивания лёссовых суглинков и супесей с песками. Чаше лёссовая толща распадается на 3—4 пачки, образующие более или менее выдержанные горизонты на большом протяжении.

В этом чередовании лёссовых прослоев с песками и другими породами водного происхождения отчетливо проявляется циклическое строение толщи и тесная связь между различными породами. Так, в обнажении у селений Приволжья и Спасского (рис. 1) слои внутри каждой пачки генетически связаны между собой постепенными и мало заметными переходами от пылеватых суглинков и глин, через супеси и глинистые пески, в чистые и более крупные пески вниз. Некоторые отдельные тонкие слои, как и пачки, хорошо прослеживаются в обнажении. Однако при изменении рельефа кровли подстилающих пород наблюдается и сокращение мощности пачек и замещение песков пылеватыми суглинками и шоколадными глинами лиманного типа.

На рис. 1 видно, что наиболее мощной пачкой слоев является нижняя, хазарская. В ней разнотекстурированные пески с линзами озерно-старичных супесей общей мощностью более 25 м перекрываются пылеватыми глинами и суглинками с раковинами пресноводных и наземных моллюсков и представляют собою нормальную свиту аллювиальных осадков. Ательские озерно-речные, старичные слои составляют неотъемлемую часть этой аллювиальной свиты. Выше залегает пачка хвалыньских отложений, представленная однородными, хорошо сортированными песками, пылеватыми суглинками и шоколадными глинами с фауной пресноводных моллюсков. Эта пачка налегает, почти согласно, на ательские глины и суглинки и частично на хазарские и ательские слои. Следующие две верхние пачки однородных песков, переходящих сверху в пылеватые супеси и суглинки, характеризуются спокойным залеганием. При этом верхняя пачка в пределах пологого склона спускается на первую надпойменную террасу, заполняя неровности в кровле хвалыньских шоколадных глин.

В других разрезах, вскрывающих связь лёссовых пород с озерно-речными, лиманными и морскими отложениями, часто можно наблюдать, что ательские слои представлены более однообразными пылеватыми супесями и суглинками лёссового типа. Это наблюдается в обнажениях под г. Сталинградом (с известной мустьерской стоянкой), в балке Сухая Мечетка, и у Светлого яра, Райгорода, а также в многочисленных разрезах скважин, пробуренных на берегах Волги у городов Ульяновска, Сызрани, Хвалынска.

Во многих разрезах можно убедиться в разновозрастности различных пачек или горизонтов, ярусов лёссовых пород. На существование перерывов в образовании лёссовых пород и связанных с ними отложений указывают ископаемые почвы, прослойки лугового мергеля, трещины усыхания, морозобойные трещины, заполненные вышележащей породой, а также ископаемые землеройные, «кротовины», ярусно расположенные в ряде обнажений. Эти землеройные, иногда с многочисленными костными остатками грызунов, видимо, образовались в период осушения участка и формирования почвы, ниже которой они обычно располагаются. Ископаемые почвы или прослойки лугового мергеля, венчающие песчано-суглинистую

пачку (ритм), свидетельствуют о смене озерно-речных условий наземными, при которых в пересыхающих озерах и лужах образовывался луговой мергель, а на сухих участках формировались почвы. Такие пограничные слои в виде ископаемых почв, гумусовых горизонтов, прослоев лугового мергеля наблюдались в многочисленных обнажениях на Волге.

Сравнение ряда разрезов, вскрывающих строение лёссовой толщи, позволяет наметить некоторые различия горизонтов или ярусов между собой. Так, верхние лёссовые горизонты отличаются по характеру соотношений фаций от нижнего горизонта лёссовых пород. Нижний, ательский горизонт лёсса, увенчанный хорошо сформированной ископаемой почвой, содержащей иногда орудия мустьерского человека (стоянка в балке Сухая Мечетка у Сталинграда), завершает собой мощную толщу хазарских аллювиальных песков, являясь частью этой свиты (рис. 3). Верхние же горизонты лёссовых пород характеризуются соотношениями фаций, не свойственными аллювиальным свитам в понимании Е. В. Шанцера (1951). Из разреза верхних лёссовых горизонтов выпадают русловые и старичные фации. Вместо них представлены лишь пойменно — павадковая и местами пляжевая фации (рис. 1); последние нигде не переходят в типичные аллювиальные пески, как суглинки нижнего горизонта.

При изучении обнажений в Поволжье и Прикаспии выявляется, что верхние горизонты лёссов переходят в типичные морские и лиманные глины, супеси и пески. Лёссовые породы налегают на шоколадные глины и ими подстилаются, а также переслаиваются с шоколадными глинами и песками, содержащими раковины морских моллюсков хвалынского яруса. Отмечая фациальные изменения хвалынских стложений на коротких расстояниях, С. К. Горелов и Ю. А. Мещеряков (1954) указывают, что по мере удаления от Волги морские шоколадные глины переходят в супеси и пески прибрежного (континентального) типа. Смена хвалынских шоколадных глин в горизонтальном направлении супесями, песками, а иногда и галечниками известна для различных районов (Сызрани, Хвалынска, Сталинграда, Уральска).

Таким образом, в пределах Среднего и Нижнего Поволжья наблюдаются генетические связи лёссовых пород с отложениями водного происхождения не только в форме переслаивания лёссов с озерно-речными, лиманными и морскими образованиями, а также в виде фациальных и литологических изменений состава лёссовых толщ. Эти изменения выражаются в замещении однородных толщ лёссов слоистыми песчано-глинистыми отложениями лёссовидного характера и далее в переходе их в горизонтальном направлении в необычайно однородные, мелкозернистые пески озерно-речного и перигляциального происхождения. Кроме того, удавалось наблюдать также переходы от тонко горизонтально слоистых, песчано-суглинистых лёссовидных пород в галечники и галечниковые пески, напоминающие прибрежные образования на современных крупных озерах. Такие галечники распространены на ступенчатых склонах правого берега р. Волги, например у г. Хвалынска.

Многими исследователями устанавливаются также генетические связи лёссовых пород с флювиогляциальными, зандровыми песками, точно так же, как давно известны генетические переходы перигляциальных суглинков во флювиогляциальные пески.

Отмеченные выше генетические связи лёссов с типичными осадками водного происхождения подтверждаются данными петрографо-минералогических исследований.

Рис. 3. Схема строения терминалов π -электронной группы π -бонти на участке между терминалами Сидарь и Хвалынский

- По И. Д. Седлецкому, В. П. Ананьеву и А. Е. Куценко (1955), содержание породообразующих минералов в лёссовых породах юга и юго-востока европейской части СССР приблизительно сходно с ассоциациями минералов в легкой и тяжелой фракциях из ледниковых и особенно озерно-ледниковых отложений. Например, в лёссовых породах Ростовской области и ледниковых отложениях района г. Вологды среди минералов глинистых фракций преобладает слюда; общими минералами являются также кварц, каолинит, гетит и гидрогетит. И по предварительным данным В. А. Франк-Каменецкого, изучавшего тонкие частицы лёсса рентгеновским методом, лёссовые породы Поволжья (Куйбышевская и Саратовская области) и озерно-ледниковые отложения Русской равнины (Вологодская область) имеют сходный минералогический состав.

С другой стороны, при изучении небольшого количества образцов лёссов Поволжья установлено сходство тонкодисперсной части лёссовых пород и глинистых прослоев в толще озерно-аллювиальных отложений, а также морских и лиманных хвалынских шоколадных глин; она в основном состоит из гидрослюд типа иллита, а иногда из монтмориллонита; в качестве примеси обнаруживаются кварц и гидроокиси железа. По данным, полученным иммерсионным методом (исследования Г. К. Лето-вой и М. Ф. Хашовой), наблюдается сходство лёссов с морскими хвалынскими глинами и глинистыми прослоями озерно-речных отложений по ассоциациям как легких, так и тяжелых минералов. Среди легких минералов характерно присутствие полевых шпатов и роговой обманки. Наряду с этим выявляются и различия между указанными породами. В лёссах наблюдается некоторое увеличение карбонатов (до 3—6%) и полевых шпатов (до 25%). Лёссовые породы в Поволжье отличаются от хазарских аллювиальных глинисто-песчаных отложений относительно малым содержанием сильно выветрелых минералов и резким увеличением полевых шпатов. Кроме того, в лёссовых породах, как и в глинистых озерно-речных отложениях, обнаруживается более высокое содержание неустойчивых минералов: эпидота, роговой обманки, пироксена.

Различия в минералогическом составе четвертичных отложений и, в частности, лёссов Поволжья проявляются преимущественно в количественных соотношениях отдельных фракций, а также тяжелых и выветрелых минералов. Однако и эти колебания в составе минералов и количественных соотношениях фракций невелики и могут быть использованы только при наличии резких границ лёссов с другими отложениями.

Условия залегания лёссовых пород и их связь с рельефом

Наши представления о палеогеографии антропогена и о генезисе лёссовых толщ будут неполными, если не увязывать распространение лёссовых горизонтов или ярусов с элементами рельефа.

Известно, что по склонам долин крупных современных рек (Урала, Волги, Дона, Днепра, Днестра) и на водоразделах хорошо прослеживаются высокие террасы или ступени-террасы и террасы-дельты (Герасимов и Марков, 1939), нередко входящие в состав ложбин стока, или, по терминологии украинских исследователей, «проходных долин». Последние, как и вся однообразная ступенчатая равнина в низовьях упомянутых рек, выработаны в толще лёссовых пород. Прослеживание террас-дельт, ступеней-террас и ложбин стока позволяет установить различные уровни, к которым они были приурочены. Количество этих уровней различно на

разных участках, но они приурочены обычно к береговым линиям водоемов, озерно-речных разливов с абсолютными высотами 15—20 м, 25—35 м, 35—45 м, 50—60 м, 80—100 м, 115—125 м, 140—150 м и 180—200 м.

Ложбины стока, террасы-дельты и ступени-террасы представляют собой в плане чередование огромных озеровидных расширений и сужений и ряд ветвящихся протоков. Интересно отметить, что днища ложбин стока или проходных долин, как и поверхности ступеней-террас, сохраняют на огромном протяжении одни и те же отметки. В наиболее глубокие из них врезаны долины современных рек. Некоторые из ложбин пересекаются долинами (Поволжье, левобережное Приднепровье). Поэтому в долинах современных рек на Русской равнине наблюдаются две системы террасовых уровней: 1) система ступеней-террас или верхних надпойменных террас, характеризующихся почти горизонтальными уклонами своих плоских поверхностей; 2) система низких террас — поймы с 2—3 ступенями и местами первая надпойменная терраса — с уклонами, равными естественному падению речных русел. Соотношения террасовых уровней в долине современной р. Волги показаны на рис. 3. Ступени-террасы и днища ложбин стока сложены с поверхности лёссовыми отложениями. В связи с этим следует отметить ничтожные размеры некоторых рек, прорезающих в своих верховьях обширные днища ложбин.

Лёссовые породы и связанные с ними хвалынские озерно-речные, лиманные и морские отложения скрывают ископаемый рельеф долин рр. пра-Волги, пра-Урала, пра-Дона, сложенный мощной толщей песков и галечников с линзами глин и супесей, переходящих в крошечные пылеватые суглинки, реже глины; лёссовые породы заполняют при этом древние переуглубленные долины в дочетвертичных породах. Поэтому обычно в основании береговых обрывов из-под чехла лёссовых пород и их фациальных аналогов выступают хазарские и древнеэвксинские слои.

Связь отдельных горизонтов четвертичных отложений и, в частности, лёссовых пород с элементами рельефа долин ясно видна в долине р. Волги, между Сызранью и Хвалынском (рис. 3). Как видно на схеме, здесь преобладает не прислонение, а перекрывание древних отложений более молодыми; причлененными же к хвалынским, хазарским и более древним породам оказываются только верхнечетвертичные и современные аллювиальные и озерно-болотные отложения. Наложенный, облекающий характер залегания различных толщ четвертичных отложений обусловливает отсутствие прямой связи террас в долине р. Волги с неогеновыми и древними четвертичными отложениями. Здесь кинельские отложения выполняют глубокие понижения в мезозойских и палеозойских породах, образуя систему р. палео-Волги. Кинельские слои перекрываются акчагыльскими прибрежно-морскими осадками, а также мощным плащом дельтовых и озерных отложений апшерона. В неглубоких эрозионных ложбинках, балках, не выраженных в современном рельефе, залегают бакинские озерно-аллювиальные отложения. Хазарские аллювиальные пески и озерные глины заполняют глубокий врез р. пра-Волги и вместе с ательскими слоями слагают террасированный рельеф долины, погребенный мощной толщей морских, лиманных, озерно-речных и лёссовых отложений хвалынского яруса. Днище пра-Волги не достигло дна долины палео-Волги и значительно переуглублено по сравнению с днищем современной р. Волги.

Как видно на схеме (рис. 3), верхний горизонт лёсса покрывает чехлом различной мощности поверхность всех ступеней-террас, включая и

нижние надпойменные террасы. Пылеватые суглинки и супеси этого горизонта заполняют неровности расчлененного рельефа с ископаемыми оползнями и не выраженными в рельефе оврагами; подобные явления сейчас происходят в водохранилищах (Шанцер и Имшенецкий, 1955).

Таким образом, верхний горизонт лёссовых пород, как и вся толща лёссов, сглаживает ископаемый, местами сильно изрезанный, многоступенчатый, равнинный рельеф как в Поволжье (рис. 3), так в Прикаспии и Придонье (рис. 2). При этом в обнажениях по оврагам и долинам мелких рек нередко можно наблюдать увеличение мощности лёссовых пород с повышением местности, что не свойственно делювиальным образованиям, к которым обычно относят лёссовые породы по правобережью рр. Волги и Дона.

Кроме того, следует учитывать фациальные изменения, которые связаны с особенностями форм древнего, подстилающего рельефа, с его неровностями. Эти изменения проявляются в смене в горизонтальном направлении однородных толщ лёссов слоистыми песчано-глинистыми отложениями лёссовидного характера и далее однородными, мелкозернистыми песками с косой и горизонтальной слоистостью. При этом резкие колебания поверхности подстилающих пород обуславливают быструю смену фаций на коротком расстоянии. Малые изменения древнего рельефа вызывают и постепенные, мало заметные изменения в составе осадков, например у г. Галича на Днестре и у г. Сызрани на Волге.

В ряде карьеров и в обнажениях на Волге отмечается такая последовательность в изменениях состава хвалыньских шоколадных глин. С повышением древней поверхности происходят выклинивание прослоев глин и замещение их глинистыми песками, пылеватыми суглинками и супесями лёссового облика с характерной облекающей, параллельной склону слоистостью, о которой писал еще А. Н. Мазарович (1935). Эта слоистость характерна для озерных мелководных и дельтовых отложений и напоминает новые осадки в водохранилищах. На повышенных участках древнего рельефа наблюдается менее однородная толща лёссов, которая представлена пачками переслаивания суглинков, супесей и песков. Характерно, что вблизи древних склонов, сложенных плотными породами — известняками, песчаниками, мелями, прослеживаются галечниковые прослойки и линзы. На присклоновых участках можно наблюдать также обогащение лёссовых пород и хвалыньских шоколадных глин щебнем и обломками местных пород, а также смену их типичными делювиальными разностями суглинков и супесей лёссового облика (рис. 1 и 3).

В связи с изложенным нам представляется, что охарактеризованные выше два типа разрезов лёссовых пород отражают не возрастные, а фациальные различия. Вместе с тем связь лёссов с озерно-речными, лиманными и морскими отложениями хвалыньского яруса позволяет предполагать, что развитие ложбин стока, ступеней-террас и террас-дельт было связано с деятельностью ледников, ледниковых водоемов и потоков, в которых и откладывались пылевато-глинистые осадки, послужившие материалом для лёссовых пород.

На основании сказанного можно сделать следующие выводы.

1. Лёссовые породы возникли первоначально в виде пылевато-глинистых осадков озерно-речного, лиманного и водно-ледникового происхождения. Они залегают на расчлененной поверхности древне-четвертичных и дочетвертичных отложений. Эти лёссовые породы распространены значительно шире, чем делювиальные отложения, которые приурочены лишь к склонам и обогащены обломками местных пород.

2. Лёссовые породы, как и флювиогляциальные, озерно-ледниковые и ледниковые отложения на севере Русской равнины, заполнили глубокие понижения — речные долины, балки и овраги, сnivelировав рельеф до четвертичных пород, а иногда совершенно скрыв его.

3. Лёссовые породы, образуя вместе с озерно-речными и другими водными отложениями сплошной покров неравномерной мощности, создают ступенчатые равнины, ступени-террасы, террасы-дельты, а также ложбины стока. Перекрывание ими древнечетвертичных отложений, заполняющих хорошо разработанные прадолины (пра-Волга, пра-Урал, пра-Дон и др.), обуславливает наложенный характер современного рельефа Поволжья, Прикаспия, Придонья и, возможно, всей южной половины Русской равнины: верхний горизонт лёсса покрывает здесь чехлом неравномерной мощности все ступени — террасы, спускаясь и на нижние надпойменные террасы.

4. Лёссовые породы генетически связаны с ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями, а также с лиманными и морскими отложениями.

5. Несмотря на местные различия, геоморфологические условия залегания и стратиграфические особенности лёссовых отложений на территории Украины и юго-востока Русской равнины имеют много общего.

На общность условий образования лёссовых пород указывают палеонтологические остатки и вещественный состав лёссов и их фациальных аналогов.

Условия образования лёссовых пород

Лёссовые породы, как было указано выше, отличаются однообразием состава, что и позволило В. А. Обручеву, И. Д. Седлецкому и другим считать эоловый процесс основным процессом лёссообразования. При этом принимают, что южнорусские лёссы образовывались за счет развеивания ледниковых отложений.

В. Г. Бондарчук, (1939; Бондарчук, Веклич и др., 1955), М. В. Веклич (Бондарчук, Веклич и др., 1955) и многие другие исследователи объясняют образование лёссовых пород главным образом деятельностью водных потоков, а также переотложением ссадов ледникового и доледникового возраста.

Доказательством существования водных потоков и мелководных водоемов, периодически осушавшихся, являются многочисленные находки в лёссах раковин пресноводных и наземных моллюсков (Бондарчук, Веклич и др., 1955). Среди пресноводных моллюсков, встречающихся в лёссах, характерны угнетенные, недоразвитые, мелкие формы, свидетельствующие, видимо, о большой мутности воды и о неблагоприятных условиях в водоемах, в которых обитали эти формы. Как правило, угнетенные формы книзу, в аллювиальных песках, сменяются более крупными, нормальными формами. Такую смену фаун можно наблюдать, например, в верхах хазарских отложений, где аллювиальные пески перекрываются пылеватými лёссовыми суглинками ательскими слоями.

По мнению В. Н. Сукачева и З. К. Долгой, остатки растений, обнаруженные в лёссах, могли быть занесены только водным путем. К этому мнению склоняется Л. С. Берг (1947), который привел большой список находок в лёссах ископаемой флоры и фауны.

Однако противоположные точки зрения на происхождение лёссов, на наш взгляд, могут быть органически объединены в золово-водной гипотезе. Нам представляется, что материал лёссов отлагался преимущест-

венно в потоках талых ледниковых вод, озерно-речных разливах и лиманах. Кроме того, в качестве примеси оседал и пылеватый материал эолового происхождения, возникавший при временном обсыхании прибрежной и мелководной частей водоемов. Прерывистость в осадконакоплении дает право предполагать, что и отложенные в воде пылевато-глинистые осадки под воздействием попеременного высыхания и смачивания преобразовывались в лёссовые породы в результате выветривания и почвообразования уже в период своего накопления.

Можно наметить три фазы формирования лёссовых пород.

1. Подготовительная фаза характеризуется усиленным накоплением пыли воздушным путем вместе со снегом в связи с сухостью ледникового климата и широким развитием процессов выветривания горных пород на открытых от снега и льда пространствах.

2. Фаза накопления отличается накоплением пылевато-глинистых осадков в результате оттаивания обломочного материала в водоемах, возникших в связи с потеплением климата и таянием ледников. Кроме того, в эту фазу происходит переотложение в водоемах пыли, накопленной эоловым путем в толще снега и льда.

3. Фаза диагенеза и выветривания характеризуется преобразованием пылевато-глинистых осадков в лёссовые породы в результате выветривания, а также почвообразования.

По нашему мнению, первая, подготовительная фаза преобладала в период максимальной сухости ледникового климата, когда происходило усиленное развитие льдов. Превращение водных масс в лед создало условия для интенсивного разветвления и накопления пыли (Обручев, 1948). При этом благодаря способности пыли оседать вместе со снегом и закрепляться на поверхности снега и льда в фазу нарастания льдов, накопление пыли достигло, по-видимому, больших размеров¹.

В этом отношении интересно привести наблюдения Г. Д. Рихтера (1948), который писал: «...пыль, оседающая во время дождя, через несколько часов после выпадения и высыхания почвы вновь может быть поднята ветром в воздух» (стр. 13—14). Пыль же, осевшая на снегу, закрепляется до полного стаяния снега и просыхания почвы. «Частицы пыли, попадая на поверхность снежного покрова, нагреваясь солнечными лучами, быстро погружаются в толщу снега, где и вмерзают в него. При таянии снега пылеватые частицы сносятся талыми снеговыми водами в ручьи и реки и отлагаются вместе с другим аллювиальным материалом или вместе с водами, впитывающимися в почву, вмываются в верхние слои почв» (Рихтер, 1948, стр. 13—14). Таким способом могли дополнительно обогащаться пылью, по нашему мнению, ледниковые, водно-ледниковые и озерно-речные отложения в момент их образования.

Учитывая нахождение части многоярусной толщи лёссов под мореной в Приднепровье и в других местах Русской равнины, начало накопления лёссового материала (водным путем), вероятно, следует связывать с концом хазарской эпохи, т. е. с окончанием фазы наступления и нарастания льдов (с максимумом оледенения). Присутствие в кровле хазарской толщи лёссовых пород, перекрытых ископаемой почвой с орудиями и фауной позвончатых мустьерского возраста, указывает, что в конце хазарской, или лихвинско-днепровской, эпохи водно-ледниковые потоки или

¹ Автор придерживается взглядов об одном оледенении в четвертичном периоде с двумя фазами развития: фазой нарастания и фазой таяния льдов. Указанные взгляды вряд ли можно считать обоснованными. (Ред.).

озерно-речные разливы и лиманы, возникшие на месте долин рек пра-Волги, пра-Урала, пра-Дона, прекратили свое существование, превратившись в остатки озер и болота. Развитие ледников в ательское время создало условия для формирования мощных ископаемых почв на поймах в прадolinaх, где селился мустьерский человек. Применительно к условиям оледенения перестроились флора и фауна. Преимущественное развитие получили виды растений и животных, наиболее приспособленные к суровым условиям существования в ландшафте иссякших русел и озер (Громов, 1948; Верещагин, 1953; Кипиани, 1954). К концу хазарской эпохи, по мнению М. Г. Кипиани, растительный покров приобрел более определенный характер. Во время таяния льдов, во вторую фазу оледенения, в условиях длительного потепления и широкого обводнения местности из-под льда и снега вытаивал и выносился флювиогляциальными водами вместе с песками пылевато-глинистый, тонко отмученный материал; в последнем основную часть составляла, по-видимому, пыль, принесенная ранее ветрами и отложенная в теле ледника вместе со снегом.

Таким образом, фаза аккумуляции пылевато-глинистых осадков водным путем, по-видимому, может быть отнесена к концу периода наступания, нарастания льдов на Русской равнине. Она продолжалась также во время отступления ледников, их таяния и широкого обводнения местности в связи с длительным и значительным потеплением климата. Однако многоярусное строение лёссовых пород и появление среди толщи лёссов ископаемых почв указывает на периодичность в образовании лёссовых пород на перерывы в таянии льдов, связанные с колебаниями климата. Таких смен было не менее трех, причем самый крупный перелом в обстановке Поволжья и Прикаспия, видимо, приходился на конец хазарской эпохи. В ательское время, в связи с установившимся похолоданием завершилось формирование нижних лёссов и ископаемой почвы с мустьерскими орудиями и фауной позвоночных. С началом хвалынского века наступила новая эпоха, когда и отложились пылевато-глинистые осадки; последние были преобразованы в лёссовые породы верхних горизонтов, залегающие непосредственно над ископаемой почвой с мустьерскими находками (стоянка в балке Сухая Мечетка у Сталинграда). При этом, судя по перекрыванию (внутри верхней толщи) молодыми лёссовыми горизонтами более древних, обводнение, а следовательно, и потепление климата и таяние льдов к концу хвалынского века, было прогрессирующим. Поэтому вряд ли можно увязывать лёссовые горизонты, или ярусы, с оледенениями, а ископаемые почвы с межледниковьями.

На основании палеонтологических и археологических остатков и состава лёссов и морен устанавливается общность условий образования лёссовых пород и одновременность геологических событий в четвертичном периоде на Русской равнине. Так, сходное строение четвертичных отложений в бассейнах Днепра, Дона и Волги выявляется при сравнении геологических условий захоронения мустьерских орудий и фауны в балке Сухая Мечетка (у Сталинграда) с мустьерскими находками на Азовском побережье (у Бессергеновки) и на Днепре (у Ст. Кодака). На основании данных археологии и палеонтологии И. Л. Соколовский (Бондарчук, Веклич и др., 1955) пришел к выводу, что лёссовые породы западной части СССР отложились в сравнительно короткое время, вероятно, не раньше начала максимального (рисского) оледенения. Интересно отметить, что археолог А. П. Черныш, изучавший стоянки, захороненные в лёссах Украины, оценивает время, в течение которого происходило накопление лёссового материала, в 30 000 лет. По нашим представлениям,

аккумуляция пылевато-глинистых осадков, по-видимому, продолжалась дольше, если исходить из предположения, что мустьерский этап нижнего палеолита окончился около 50 000 лет тому назад; аккумуляция же лёссового материала прекратилась 10 000—12 000 лет тому назад.

Формирование покрова лёссовых осадков происходило в тесной связи не только с климатическими особенностями ледникового и позднеледникового времени, но и в зависимости от движений земной коры. По-видимому, образованию обширного покрова лёссовых пород на Русской равнине способствовали крупные изменения в режиме Черноморского бассейна, которые происходили на границе карангатской и новозвксинской эпох и которые А. Д. Архангельским и Н. М. Страховым (1938) объясняются как климатическими, так и тектоническими причинами. Например, в результате поднятия дна Босфорского пролива Черное море превращалось в замкнутый бассейн, особенно в период таяния ледников на Русской равнине, когда впадавшие в море реки переполнялись талыми ледниковыми водами.

На колебания уровня Черного и Азовского морей в период накопления лёссовых осадков указывали В. И. Громов (1948, стр. 36—40) и В. А. Хохловкина (1940), изучавшие разрезы приморских террас у Таганрога и Ростова. Эти террасы принадлежат к типу наложенных, т. е. образовались в условиях последовательного повышения базиса эрозии. О значительном подъеме уровня воды в Черноморском бассейне свидетельствуют террасы-дельты, сложенные «шоколадными» лёссами в низовьях р. Буга, Днепра, а также Дона. Изучение приморских террас на Азовском побережье и в Прикаспии, а также террас, составляющих однообразную плоско-ступенчатую равнину в низовьях рр. Дона, Волги и Урала, позволяет предполагать, что подъем воды на месте Черноморского-Каспийского бассейна и устьев названных рек достигал не менее 80—100 над современным уровнем моря. На существование обширного водоема, так называемого Болгарского бассейна, на месте расширения долины Волги к северу от Самарской Луки указывал еще Н. А. Головкинский. В дальнейшем А. Н. Мазарович (1935) отнес осадки и формирование рельефа в Болгарской котловине к рисскому времени. Подобную котловину к югу от Самарской Луки, открытую к югу, к Каспию, выделил И. П. Герасимов (Герасимов и Марков, 1939), назвав ее Сыртовой. И. П. Герасимов связывал террасы Волги с хвалынской трансгрессией Каспийского моря и фазами новейшего понижения уровня моря. В настоящее время накопилось достаточно доказательств, подтверждающих соображения Н. А. Головкинского, А. Н. Мазаровича и И. П. Герасимова. Обширный залив Хвалынского моря на месте долины Волги распространялся далеко вверх по долине, севернее г. Куйбышева, сменяясь в устье Камы огромным озерно-речным разливом. Подобный залив существовал в хвалынское время в долине р. Урала. Имеющиеся данные позволяют предполагать существование такого залива на месте долины р. Дона; залив этот подпирал потоки талых ледниковых вод, образуя озерно-речные разливы (Горецкий, 1953; Громов, 1948). По-видимому, в то же время была залита и широкая (до 90 км) долина р. Днепра и Полесье, на что указывали Б. Л. Личков, В. Г. Бондарчук и др.

Изучение ступеней-террас и ложбин стока и взаимоотношений их с распространением покрова лёссовых пород позволяет предположить, что в конце эпохи накопления лёссовых осадков и образования ступенчатого современного рельефа юга Русской равнины произошли крупные изменения в физико-географической обстановке. При этом движения земной

коры, проявившиеся на юге в области альпийского орогенеза в конце новочетвертичной эпохи, вызвали быстрый спад воды в Новозвксинском и Хвалынском озерно-морских бассейнах и привели к разобщению их на части, а позже — к вторжению средиземноморских морских вод в Черноморскую впадину и возникновению Дневночерноморской трансгрессии.

С другой стороны, значительное потепление климата в конце новочетвертичной эпохи привело к исчезновению ледников на Русской равнине и понижению в свою очередь базиса эрозии в Черноморском и Каспийском бассейнах, т. е. к осушению местности и созданию условий для возобновления речной сети, к окончательному оформлению долин современных рек на Русской равнине. Это успело, вероятно, отразиться на усилении процессов выветривания и почвообразования, особенно в послеледниковую эпоху, когда снова стала проявляться почвенно-климатическая зональность на широких просторах.

Из всего изложенного видно, что отложение и распределение однородного пылеватого материала в лёссовых породах, как особой фации водно-ледниковых образований, определялись в конечном счете не циркуляцией воздушных масс, а режимом водно-ледниковых потоков, озерно-речных разливов и положением уровня воды в лиманах, окружавших Хвалынское и Новозвксинское озера-моря. Кроме того, накопление лёссовых пород как субаквальных осадков находилось в зависимости от былых особенностей местного рельефа. В связи с этим главнейшими генетическими типами осадка в толще лёссовых пород являются озерно-аллювиальные, пойменно-паводковые отложения, а также лиманные, дельтовые и прибрежно-лиманные, озерные мелководные образования. Дельтавиальные и болотно-аллювиальные осадки имеют ограниченное развитие, причем первые характеризуют участки склонов.

Одновременно с аккумуляцией пылеватоглинистых осадков создавались сопряженные с ними формы рельефа, которые являются существенным элементом в современном ступенчато-равнинном рельефе юга и юго-востока Русской равнины. Последний наложен на древний рельеф, который скрыт под мощной толщей лёссовых пород и лишь частично отпрепарирован абразией и эрозией.

Поэтому необходимо различать элементы современного рельефа от древних ископаемых форм рельефа. При этом элементы современного рельефа не всегда следуют ископаемым формам, так как являются самостоятельными образованиями и имеют свою историю развития.

Таким образом, исходный пылеватоглинистый материал в лёссовых породах отлагался преимущественно в ледниковое время, по нашему мнению, в конце фазы наступления льдов на Русскую равнину и в особенности в фазу таяния льдов, когда реки, превратившись в озерно-речные разливы, несли к югу мутные воды. Можно предполагать, что в послеледниковую эпоху, в процессе развития рельефа и речной сети, лёссовые породы могли окончательно сформироваться из субаквальных пылеватоглинистых осадков под влиянием выветривания и почвообразования.

Литература

- Архангельский А. Д. и Н. М. Страхов (1938). Геологическое строение и история развития Черного моря. Изд. АН СССР. — Берг Л. С. (1947). Климат и жизнь. Географиздат. — Бондарчук В. Г. (1939). О лёссе южной части Русской равнины. Сов. геология, т. IX, № 8. — Бондарчук В. Г., М. Ф. Веклич, И. Л. Соколовский. (1955). Общие положения. Путеводитель экскурсий сове-

шания по лёссовым породам УССР. Киев. — Герасимов И. П. и К. К. Марков. (1939). Ледниковый период на территории СССР. Изд. АН СССР. — Горелов С. К. и Ю. А. Мещеряков. (1954). Геоморфология и новейшая тектоника района строительства Сталинградского гидроузла. Тр. Инст. географии АН СССР. Матер. по геоморфол. и палеогеогр. СССР, вып. 12. — Горецкий Г. И. (1953). О палеогеографии Приазовья и Зап. Приманьчья в узунарско-гарканский и буртаский века. Вopr. географии, сб. 33. — Грищенко М. Н. и А. И. Коптев. (1955). Материалы к стратиграфии террасовых отложений долины Волги у села Приволжья. Тр. Воронежск. гос. унив., т. 39, сб. геол. фак., Харьков. — Громов В. И. (1948). Палеонтологическое обоснование стратиграфии континентальных отложений четвертичного периода на территории СССР (млекопитающие, палеолит). Тр. Инст. геол. наук АН СССР, вып. 64. — Кипиани М. Г. (1954). Материалы к палеогеографии Дарьинско-Уральского района северного Прикаспия в плиоценовое и четвертичное время. (Автореферат). Л. — Лысенко М. П. (1949). О механическом (элементарном) составе лёссовых грунтов. ДАН СССР, т. XIX, № 2. — Мазарович А. Н. (1935). Стратиграфия четвертичных отложений Среднего Поволжья. Тр. Ком. по изуч. четверт. периода АН СССР, т. 4, вып. 2. — Милановский Е. В. (1935). Плиоценовые и четвертичные отложения Сызранского района. Тр. Ком. по изуч. четверт. периода, т. 4, вып. 2. — Муратов М. В. (1953). Об условиях образования суглинков в четвертичном периоде. Бюлл. Ком. по изуч. четверт. периода, № 19. — Николаев Н. И. (1937). О возрасте четвертичной волжской фауны млекопитающих. Бюлл. МОИП, отд. геологии, т. XV, вып. 6. — Обручев В. А. (1948). Лёсс как особый вид почвы, его генезис и задачи его изучения. Бюлл. Ком. по изуч. четверт. периода, № 12. — Обручев В. А. (1955). Новые работы по лёссу (о работах И. Д. Седлецкого и В. П. Ананьева). Изв. АН СССР, сер. геол., № 4. — Рябченков А. С. (1955). К вопросу о происхождении лёсса Украины в свете минералогических данных. Бюлл. Ком. по изуч. четверт. периода, № 20. — Седлецкий И. Д., В. П. Ананьев и А. Е. Куценко. (1955). Ледниковые отложения как источник лёссовой пыли. Бюлл. Ком. по изуч. четверт. периода, № 20. — Соколов Н. Н. (1955). Особенности рельефа северо-запада Русской равнины и их влияние на ландшафты. Сб. «Памяти Л. С. Берга», Изд. АН СССР. — Хохловкина В. А. (1940). Террасы Азовского побережья между Ростовом и Таганрогом. Тр. Инст. геол. наук АН СССР, вып. 28, сер. геол., № 8. — Фюрон Р. (1955). Введение в геологию и гидрогеологию Турции. — Шанцер Е. В. (1951). Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит. Тр., Инст. геол. наук АН СССР, вып. 135, сер. геол., № 55. — Шанцер Е. В. и А. И. Имшенецкий. (1955). К вопросу об абразии берегов водохранилищ. Сб. «Вопросы изучения подземных вод и инженерно-геологических процессов», изд. Моск. геол.-развед. инст.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . X

Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К О Е О Б Щ Е С Т В О С О Ю З А С С Р

И. Н. САФРОНОВ

ТЕРРАСЫ КУБАНИ

В последние годы (1948—1952 гг.) автор проводил геолого-геоморфологические исследования на территории северо-западного Кавказа. Одним из итогов этих исследований явилось уточнение известных в литературе стратиграфических схем террас р. Кубани (Колесников, 1932, 1933; Мирчинк, 1928; Рейнгард, 1929, 1936; Соколов, 1930) и палеогеографических условий их формирования.

В настоящей статье излагаются новые данные о террасах р. Кубани, выясняется их отношение к террасам наиболее крупных притоков Кубани, древнеледниковым моренам долины р. Теберды, покровным суглинкам и плиоценовым континентальным образованиям западного Предкавказья, приводится схема корреляции новейших континентальных отложений системы Кубани и делаются некоторые общие палеогеографические выводы.

По р. Кубани прослеживается десять надпойменных террас (табл. 1), объединенных в две серии: серию низких террас (V—VII) с относительным превышением от 1—2 до 30—35 м и серию высоких террас (VIII—X)

Таблица 1

Относительные высоты (в м) надпойменных террас р. Кубани

Номенклатура террас		Участки реки			
		Черкесск	Невинномысск	Армавир	Гулькевичи
Серия низких террас	I	1—2	1—1.5	1	2
	II	4—5	4	4	4—6
	III	8—9	7—8	8—9	8—10
	IV	12—14	12—13	12	12—15
	V	16—18	16—17	18—20	20
	VI	20—22	20—22	20—25	
	VII	28—30	35	30—35	
Серия высоких террас	VIII	45	60—70	50—60	25—30
	IX	100—120	120—150	100—110	40—45
	X	180—200	200—220	70	—
Покровные галечники		250	350	—	—

с высотами от 45 до 180—220 м. Кроме того, на междуречьях левобережных притоков Кубани по северному подножью третичной куэсты распространены покровные галечники, которые от террасовых отложений отличаются сильно выветрелой галькой.

Террасы Кубани, как низкие, так и в особенности высокие, развиты преимущественно по левобережью реки. Исключение представляет район г. Черкесска, где X терраса образует междуречье Кубани и Кумы, и отрезок Кубани ниже г. Кропоткина, где галечники террас и замещающие их осадки выполняют депрессию на правобережье этой реки.

Террасы Кубани в среднем и частью в нижнем течении реки характеризуются цокольным строением, за исключением I террасы, которая везде сложена аллювием до уреза воды. В верховьях Кубани все низкие террасы аккумулятивные; они вырезаны в мощной галечной толще, выполняющей переуглубленное древнеледниковой эрозией ложе реки. Между Клухори и Армавиром низкие террасы являются вложенными, их галечники залегают на цоколе из коренных пород. Ниже Армавира эти террасы переходят в наложенные, так как они выработаны в рыхлых наносах полностью или частично погрузившихся высоких террас.

Аллювиальный покров террас отличается в свою очередь довольно сложным строением. В большинстве случаев он образуется двумя ярусами осадков: нижним, представленным галечниками, и верхним, сложенным суглинками. Однако соотношение между ярусами аллювия варьирует в довольно широких пределах. Так, например, на участках нижнего течения реки роль суглинков в образовании аллювиальных отложений возрастает. Точно так же возрастает роль суглинков в строении аллювия высоких террас по сравнению с террасами нижнего комплекса. В этом же направлении усложняется их разрез и увеличивается мощность.

Гранулометрический состав галечников террас, представленных главным образом галькой кристаллических пород Кавказского хребта, изменяется вниз по течению реки. Для низких террас намечается следующая последовательность изменения фаций галечников: галечно-валунная (Клухори — Черкесск), галечная (Черкесск — Невинномысск), галечно-гравийная (Невинномысск — Армавир) и галечно-гравийно-песчаная (Армавир — Кропоткин). Для всех высоких террас свойственна галечно-валунная фация, которая здесь наблюдается значительно ниже по течению, чем на низких террасах. В эпоху аккумуляции галечников высоких террас область сноса располагалась ближе, чем в эпоху аккумуляции галечников более низких террас, когда гидрографическая сеть все более и более удлинялась.

В шлихах из аллювиальных отложений террас Кубани отмечено 39 минералов тяжелой фракции, однако преобладающими являются гранат (32%), амфибол (19.5%), гематит (16%) и эпидот (около 11.5%). Подчиненное значение имеют магнетит, ильменит и ромбический пироксен, присутствующие, примерно, в равных количествах (свыше 5%). Содержание всех остальных минералов выражается в большинстве случаев долями процента. Из данных шлихового опробования галечной серии террас Кубани видно, что для каждой, отдельно взятой эпохи аккумуляции обломочного материала была одна и та же область сноса, охватывающая верховья современной Кубани и ее левобережных притоков. Все отмеченные минералы в шлихах из галечных отложений Кубани связаны с коренными породами, развитыми в верховьях этой реки и ее левобережных притоков. Всегда, по крайней мере начиная с эпохи аккумуляции покровных галечников, существовали единые пути разноса обломочного и шлихового материала во всей системе Кубани, четко очерченные современными меридионально направленными долинами и контурами их древних и молодых террас. Сопряженное развитие всей системы Кубани и формирование ее отдельных геоморфологических элементов выявляются

вполне определено. Наиболее показательны в этом отношении данные о соотношении террас Кубани и ее левобережных притоков (табл. 2).

В долинах притоков Кубани: Б. и М. Зеленчуков, Урупа, Лабы и Белой выявлена та же система террас, что и на Кубани. В горной области террасы притоков Кубани распространены локально, они приурочены глав-

Таблица 2

Относительные высоты (в м) террас Кубани и ее левобережных притоков

Номенклатура террас		Кубань (Черкесск—Невинномысск)	Теберда	М. Зеленчук	Б. Зеленчук	Уруп	Лаба	Белая
		Среднее и нижнее течение						
Серия низких террас	I	1—2	1—2	Пойма (< 1 м)				1
	II	4—5	4—5	1—1.5	1.2	1	1—1.5	4
	III	8—9	8—9	4	3.5—4	4—5	4—5	7—8
	IV	12—14	12	8—9	7—12	7—11	7—8	12
	V	16—18	16—17	12—16	12—16	12—15	—	16
	VI	20—22	22—25	22—25	22—30	20—25	20	21
	VII	28—35	30—35	—	—	—	30	30
Серия высоких террас	VIII	45—70	—	35—40	35—45	35—45	35—40	40—60
	IX	100—150	100	90—100	90—100	70—90	80—110	75—110
	X	180—220	—	180—200	180—200	180	160—180	160—170
Покровные галечники		250—350	—	280	300	—	—	—

ным образом к расширенным участкам долин. Фрагменты высоких террас (VIII—X), в том числе и уровень покровных галечников, вырисовываются здесь как внутриводораздельные элементы рельефа. Все это, наряду с наличием докембрийских и палеозойских пород в составе покровных галечников, говорит о том, что в эпоху аккумуляции этих галечников Главный и Передовой хребты, а также система куэст существовали как самостоятельные орографические элементы.

Предгорная равнина является областью сплошного развития высоких террас. Севернее третичной куэсты они последовательно обрываются уступами, образуя междуречья левобережных притоков Кубани. По отношению к Кубани эти террасы являются внутриводораздельными образованиями. Каждый из уступов высоких террас на междуречьях притоков Кубани формировался в результате эрозионной деятельности главной реки, отступавшей постепенно к северу под влиянием новейших поднятий Кавказского хребта. Низкие террасы Кубани (I—VII) сочленяются с аналогичными террасами ее левобережных притоков в их устьях. По мере продвижения вверх по течению притоков в начале I, а затем II террасы устьевых участков переходят в пойму. Этим объясняется наличие меньшего числа низких террас в долинах притоков Кубани.

Таким образом, формирование террас системы Кубани в целом происходило не только под влиянием новейших поднятий, но зависело и от положения местного базиса эрозии, таким является главная река (Кубань). Врезание Кубани (снижение базиса эрозии) вызывало усиление

эрозии в ее притоках, которая постепенно распространялась вверх по течению, обуславливая формирование уступов террас.

Проведенное автором совместно с геоморфологом П. Сафроновым изучение соотношений и строения террас Кубани и морен долины р. Теберды существенно дополняет известные в литературе представления о древнем оледенении Тебердинского района (Мирчинк, 1928; Рейнгард, 1926; Тушинский, 1949).

Низкие террасы Кубани (I—VII), как установлено нашими наблюдениями, без перерыва переходят в соответствующие террасы Теберды, которые в свою очередь примыкают к ледниковым аккумулятивным образованиям. Так, VII терраса примыкает к Джемагатскому моренному комплексу (устье р. Джемагат); VI, V и IV террасы увязываются с Каракельским моренным комплексом (курорт Теберда); III и II прослежи-

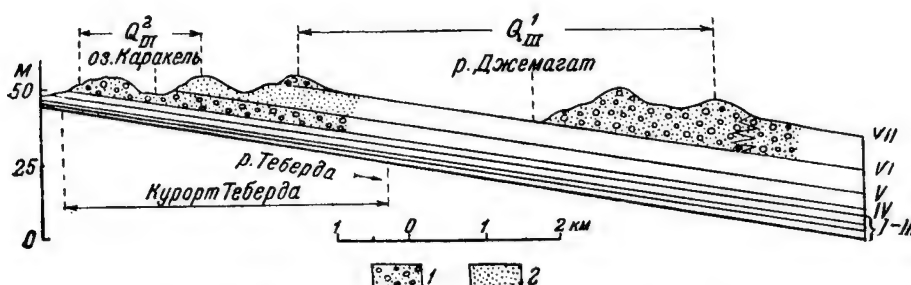


Рис. 1. Схема соотношений террас и морен долины Теберды.

1 — ледниковые и флювиогляциальные отложения; 2 — пески озерного происхождения. Римские цифры — номера террас: Q_{III}^I — моренный комплекс Тебердинского ледника (I фаза); Q_{III}^2 — моренный комплекс Тебердинского ледника (II фаза — Каракельская).

ваются до Гоначхирской морены, но примыкают к ней только II терраса; I терраса доходит до Аманаузской морены. VII терраса и Джемагатский моренный комплекс сложены материалом одинаковой крупности. VI терраса примыкает к первому валу Каракельского моренного комплекса, но строение их совершенно различное. Терраса сложена в основном грязно-серыми песками озерного типа, моренный вал — валунами и крупной галькой. Пески VI террасы слагают второй вал указанного комплекса морен, к которому примыкает V терраса, сложенная валунно-галечным материалом. V терраса по отношению к VI является вложенной (рис. 1). Все это говорит о том, что ко времени отложения песков VI террасы в обширном приледниковом бассейне первый моренный вал Каракельского комплекса существовал, а второй и третий образовались при повторном возвращении Тебердинского ледника в район курорта.

Эти данные позволяют выделить восемь стадий отступления Тебердинского ледника, не считая максимума и предполагаемой стадии (табл. 3). Депрессии снеговой границы этих стадий отвечают стадиям отступления ледников Центрального Кавказа (Варданянц, 1937).

Стадии отступления Тебердинского ледника объединяются в две фазы: Тебердинскую (Джемагатский моренный комплекс и первый вал Каракельского моренного комплекса) и Каракельскую (Каракельский моренный комплекс, Гоначхирская и Аманаузская морены и менее значительные остановки ледника), разделенные стадией значительного отступления ледника (до устья р. Гоначхир) с обратным его возвращением (до пер-

Стадии отступления Тебердинского ледника

Таблица 3

№№ террас	Высота террас (в м)		Морены Теберды, стадии оледенения	Депрессия снеговой границы (в м)	Фазы Тебердин- ского оледенения
	Кубани	Теберды			
VII	28—35	30—35	Максимум	1000—1200	I фаза (Тебердин- ская)
			Джемагатский моренный комплекс	900	
VI	20—22	22—25	Отступление ледника	?	Каракельское ко- лебание
V	16—18	16—17	Каракельский моренный комплекс	800	II фаза (Кара- кельская)
IV	12—14	12			
III	8—9	8—9	?	?	
II	4—5	4—5	Гоначхирская морена	550—600	
I	1—2	1—2	Аманаузская морена	350—400	
Пойменно-русловое отложе- ние			Алибекская морена	250	
			Птышская морена	130	
			Четчинская морена	80	
			Современное положение ледника	—	

вого вала Каракельского моренного комплекса), которую мы называем Каракельским колебанием.

На правом, крутом берегу Кубани ниже ст. Прочноскопской террасы морфологически не выражены. Берег на всю высоту (40—50 м) сложен большей частью покровными суглинками. Здесь были детально изучены три наиболее типичных разреза этих отложений: у хут. Северо-Кавказского, у г. Крпоткина и у ст. Тбилисской. Эти разрезы в результате погружения отдельных горизонтов отложений вниз по течению реки накладываются один на другой и дают характеристику строения всей толщи суглинков равнины западного Предкавказья (рис. 2).

Покровные суглинки в целом по литологическим признакам подразделяются на три яруса: нижний ярус (Северо-Кавказский разрез) представлен плотными желтовато-бурыми глинами и красновато-бурыми суглинками (25.6 м); средний ярус (средняя часть Крпоткинского разреза и нижняя часть Тбилисского) представлен плотными коричнево-бурыми глинами и суглинками (17.8 м); верхний ярус (верхи Тбилисского разреза) сложен светлыми, пористыми, лёссовидными суглинками (14.8 м).

Толща суглинков залегает на галечниках (12.5 м) X террасы Кубани (по нашей номенклатуре), перекрывающих континентальные отложения

армавирской свиты (Северо-Кавказский разрез). Эти галечники указывают на наличие перерыва между армавирской свитой и нижним ярусом покровных суглинков. Аналогичный перерыв в процессе образования суглинков наблюдается на границе между нижним и средним их ярусами; он выражен в аккумуляции песков (10 м) с прослоями мелкогалечных конгломератов и глеевидных глин (Кропоткинский разрез). Процесс накопления суглинков среднего и верхнего ярусов шел, по-видимому, непрерывно.

Левобережные террасы Кубани и суглинки западного Предкавказья территориально разобщены долиной этой реки. Однако принадлежность суглинков к определенным террасовым уровням с достаточной определенностью выявляется на основании сопоставления разрезов этих отложений.

Наблюдениями установлено, что сложно построенная толща суглинков разреза у хут. Северо-Кавказского (нижний ярус), залегающая на погружающихся галечниках X террасы Кубани, по своему строению ничем не отличается от суглинков той же террасы у хут. Нижне-Георгиевского (в 5 км выше Черкесска), где высота последней достигает 200 м над

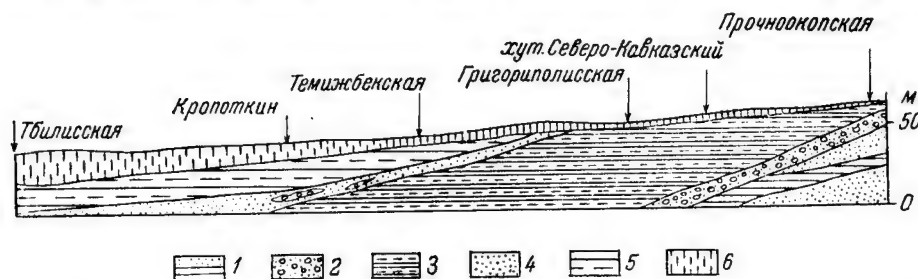


Рис. 2. Схема строения правого берега Кубани (Прочноокопская — Тбилисская).

1 — континентальные отложения армавирской свиты (N_2^{1-2}), 2 — галечники верхнеплиоценовой террасы Кубани (N_2^3), 3 — глины и суглинки (нижний ярус) верхнеплиоценовой террасы Кубани (N_2^3), 4 — пески нижнечетвертичной террасы Кубани (Q_1), 5 — глины и суглинки (средний ярус) ниже- и среднечетвертичной террасы Кубани (Q_{I-II}), 6 — лёссовидные суглинки (верхний ярус) верхнечетвертичных террас Кубани (Q_{II}).

поймой реки. Средний ярус суглинков (Кропоткинский разрез) абсолютно тождественен разрезам аллювиальных отложений ниже лежащей IX террасы Кубани. Накопление суглинков среднего яруса, по-видимому, продолжалось и в более позднее время, так как на VIII террасе Кубани у Черкесска развиты аналогичные суглинки. Верхний ярус лёссовидных суглинков не отличимы от соответствующих суглинков серии низких левобережных террас Кубани.

Континентальные отложения «армавирской свиты» впервые были выделены В. П. Колесниковым (Колесников, 1931, 1932, 1933). Полный их разрез выражен на правом берегу Кубани, у ст. Прочноокопской. Верхняя часть разреза представлена косослоистыми песками с прослоями мелкой гальки и гравия из пород Кавказского хребта (9 м). Ниже залегают глинистые кирпично-красные пески (4 м). Еще ниже залегает мощная толща переслаивающихся косослоистых песков и пестроцветных глин (45 м). Вся толща континентальных осадков залегает на размытой поверхности морских отложений верхнего сармата.

К северу и западу от ст. Прочноокопской отложения армавирской свиты быстро погружаются под аллювиальные галечники и суглинки.

У ст. Расшеватка красные глины этой свиты были встречены скважиной на глубине 90 м, а у хут. Владимировского (в 25 км юго-западнее г. Армавира) на глубине 110 м. В области Ставропольского поднятия аналоги армавирской свиты, представленные большей частью песками (бассейн р. Кугульты, Косякинский карьер у г. Ставрополя), выходят на дневную поверхность.

У ст. Прочноокопской на отложениях армавирской свиты залегают галечники X террасы Кубани. Относительное превышение этой террасы составляет 60 м. Вниз по течению Кубани галечники X террасы и подстилающие их отложения армавирской свиты быстро погружаются. У хут. Северо-Кавказского они находятся на высоте 10 м над Кубанью, а у ст. Григориполиссской скрываются под урез реки.

На левом берегу Кубани на отложениях армавирской свиты залегают покровные галечники системы р. Кубани (Сафронов, 1954). Это видно

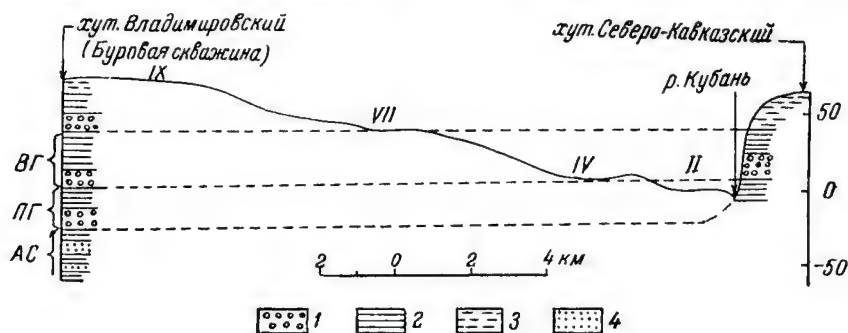


Рис. 3. Соотношение террас Кубани и континентальных отложений армавирской свиты.

1 — галечники, 2 — глины, 3 — суглинки, 4 — пески. Римские цифры — террасы. ВГ — отложения верхнеплиоценовой террасы (N_2^3), ПГ — покровные галечники, АС — армавирская свита.

из анализа данных скважины, пройденной у хут. Владимировского. Скважина была заложена на поверхности IX террасы Кубани. В разрезе скважины выделяются три горизонта галечников, разделенных суглинками. Верхний горизонт галечников составляет часть разреза этой террасы, средний принадлежит X террасе, погружение которой видно на правом берегу Кубани, у хут. Северо-Кавказского, находящегося в створе скважины, а нижний — покровным галечникам, которые подстилаются песками и пестроцветными глинами армавирской свиты (рис. 3). Таким образом, наиболее древние аллювиальные отложения Кубани — покровные галечники — лежат стратиграфически выше континентальных отложений армавирской свиты.

Изложенные данные о террасах Кубани существенно уточняют известные в литературе представления об их продольном профиле (Мирчинк, 1928; Рейнгард, 1926).

В отношении особенностей продольного профиля террас Кубань делится на два отрезка: верхний — меридиональный (Клухори—Невинномысск) и северо-западный (Невинномысск—Армавир) и нижний — меридиональный (Армавир—Темижбекская) и юго-западный (Темижбекская—Краснодар). Для верхнего отрезка Кубани характерен нормальный продольный профиль террас, когда относительные высоты террас несколько возрастают в направлении течения реки. В пределах нижнего

отрезка Кубани, напротив, выражен перевернутый профиль террас, с обратной последовательностью напластований их галечников и замещающих их осадков (рис. 4).

Первый тип продольного профиля террас закономерно повторяется и в левобережных притоках Кубани, а именно: М. и Б. Зеленчуках и Урупе, а также Лаббе, выше г. Лабинска, и Белой, выше г. Майкопа. Для нижних отрезков Лабы и Белой, наоборот, характерен второй тип продольного профиля террас Кубани.

При анализе продольного профиля террас Кубани выявляются некоторые особенности положения поверхности каждой, отдельно взятой террасы. Так, чем ниже терраса, тем далее вниз по течению Кубани отодвигается предел нарастания ее относительных высот, не выходя, однако, за границы верхнего отрезка реки. В пределах нижнего отрезка Кубани выражена обратная закономерность, а именно: чем выше терраса, тем раньше снижаются относительные высоты ее поверхности и под более крутым углом происходит погружение ее галечников под урез реки. Эти особенности изменения погружения поверхностей террас по продольному профилю Кубани наиболее характерны для серии высоких террас, включая и покровные галечники. Поверхности низких террас, за исключением седьмой, идут параллельно и равномерно снижаются вниз по течению реки.

Ниже приводится схема корреляции описанных типов новейших континентальных отложений системы Кубани (табл. 4). Эти типы отложений увязываются территориально. Так, морены Теберды примыкают к террасам, которые в свою очередь продолжают в долине Кубани; отдельные ярусы суглинков правобережья Кубани являются литологическим аналогом суглинков левобережных террас той же реки. Таким

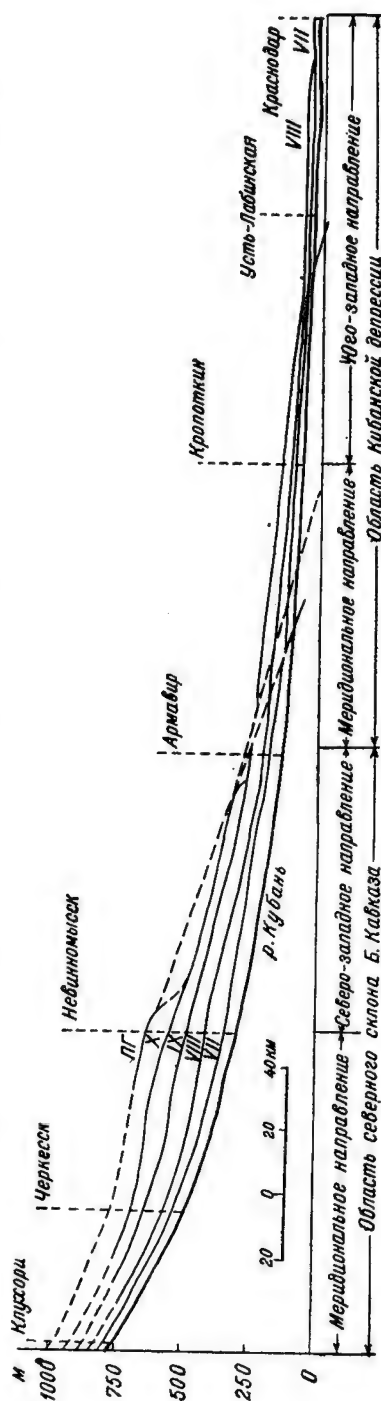


Рис. 4. Продольный профиль террас Кубани
ПГ — уровень покровных галечников. Римские цифры — уровни террас.

Таблица 4

Схема корреляции новейших континентальных отложений системы р. Кубани

Террасы Кубани			Морены Теберды		Покровные суглинки западного Предкавказья	Возраст
номенклатура		относительная высота (в м)				
Серия низких террас	I	1—2	Аманаузская	Тебердинское оледенение (II фаза)	Лёссовидные суглинки (Тбилисский разрез)	Верхний квартал
	II	4—5	Гоначхирская			
	III	7—9	?			
	IV	12—13	Каракельский моренный комплекс	Отступление ледника (Каракельское колебание)		
	V	16—20				
	VI	20—25				
	VII	28—35	Джемагатский моренный комплекс	Тебердинское оледенение (I фаза)		
Серия высоких террас	VIII	45—70	?	Красно-бурые суглинки и глины (Кропоткинский разрез)	Средний квартал	
	IX	110—150			Нижний квартал	
	X	180—220			Верхний плиоцен	
Покровные галечники		250—350				
Армавирская свита континентальных отложений						Средний и нижний плиоцен
Морские отложения						Верхний сармат

образом, со стороны стратиграфической увязки указанных отложений предлагаемая схема представляется вполне обоснованной фактическим материалом.

В основу датировки континентальных отложений положены данные по изучению стратиграфических соотношений террас Кубани и смежных

речных долин. Вопрос о возрасте террас Кубани сравнительно подробно рассмотрен в специальной статье (Сафронов, 1955); поэтому здесь указываются лишь главные моменты.

Возраст серии низких террас Кубани устанавливается с достаточной определенностью по находке верхнечетвертичной формы *Elephas primigenius* в галечниках 14-метровой террасы у разъезда Гирей в районе Гулькевичей (Громов, 1948). Здесь же были обнаружены остатки нижнечетвертичной формы *Elephas wüsti*, принадлежащей, по-видимому, отложениям IX террасы, которые погружаются под галечники ниже лежащих террас в этом районе. В соответствии с этими данными VIII терраса Кубани может быть датирована среднечетвертичным временем.

X терраса является верхнеплиоценовой (апшеронской). Эта терраса в районе Черкесска образует междуречье Кубани и Кумы. Отсюда она прослеживается в бассейн Подкумка, где увязывается с верхним ярусом травертинов горы Машук, в которых найдены остатки *Elephas meridionalis* (Иванов, 1946; Николаев, 1948). Для покровных галечников системы Кубани принимается верхнеплиоценовый (акчагыльский) возраст по аналогии с соответствующими образованиями района Пятигорья (Сафронов, 1953; Варданянц, 1948). Во всяком случае эти галечники моложе континентальных отложений армавирской свиты, в которых (Косякинский карьер у Ставрополя) в последнее время обнаружены остатки средне- и нижнеплиоценовой фауны позвоночных (Беляева, 1944; Верещагин, 1954).

Приведенными данными в достаточной степени освещается вопрос о возрастных соотношениях террас Кубани и связанных с ними морен Теберды и суглинков западного Предкавказья. Однако предлагаемая схема стратиграфической корреляции этих отложений является рабочим вариантом, требующим уточнения на основе разрабатываемой в настоящее время схемы параллелизации новейшей геологической истории Черного и Каспийского морей.

Обобщая вышеизложенные материалы, полученные в результате комплексного изучения террас Кубани, мы приходим к следующим выводам.

1. Основным фактором формирования террас Кубани являются новейшие тектонические движения, проявившиеся в разных частях северо-западного Кавказа с противоположными знаками. В горной области преобладал процесс поднятия и нарастания высот местности, тогда как в пределах Кубанской депрессии происходили периодические опускания. Область положительных движений постепенно разрасталась, захватывая участки депрессии, где ранее были выражены тенденции к опусканию. Ко времени образования серии низких террас восходящие движения охватили уже большую часть Кубанской депрессии.

2. Формирование террас системы Кубани в целом происходило в геоморфологических условиях, близких к современным. Угол наклона рек, при котором происходила аккумуляция галечников всех серий террас, в том числе и покровных галечников, был близок к профилю современного русла Кубани. Этот вывод подтверждается наблюдениями над гранулометрическим составом галечников террас, который в каждом, отдельно взятом пересечении долины обнаруживает близкое сходство с гранулометрическим составом галечников современного русла.

3. Гидрографическая сеть системы Кубани была заложена в эпоху, предшествующую аккумуляции покровных галечников (нижний плиоцен), и тогда уже имела основное меридиональное направление с отклонением к западу в низовьях рек в соответствии с погружением в этом направле-

нии горной страны. Меридионально направленная гидрографическая сеть удлинялась постепенно по мере поднятия горной страны, регрессии морей, занимавших Кубанскую депрессию, и миграции к северу р. Кубани на ее западном отрезке. В эпоху аккумуляции верхнеплиоценовых галечников имело место слияние рек в предгорьях, а Кубань отдавала часть своих вод в бассейн Кумы, но это были лишь частные случаи, не нарушившие общей тенденции меридионально направленного стока.

4. Локализация стока вод в современных долинах предгорий северо-западного Кавказа произошла в начале четвертичного периода (эпоха формирования IX террасы). В области Кубанской депрессии гидрографическая сеть была еще разобщена; Кубань, Лаба, Белая и другие реки впадали в морской залив самостоятельно. Окончательное формирование современного плана гидрографической сети системы Кубани произошло в среднечетвертичное время (эпоха формирования VIII террасы), в результате резкого отклонения главной реки к западу ниже Кропоткина и перехвата ею левобережных притоков.

5. В горной области северо-западного Кавказа наблюдаются несомненные признаки только верхнечетвертичного оледенения, которые лучше сохранились в долине Теберды. Для Тебердинского ледника устанавливается восемь стадий отступления, не считая максимума и предполагаемую стадию. Древнее оледенение сказалось на формировании серии низких террас Теберды и связанных с ними террас верховьев Кубани. Наступание и стадийные остановки ледника вызвали накопление аллювия террас, а моменты его отступления — врез водных потоков в отложения террас.

Литература

- Беляева Е. И. (1944). Новые материалы по верхнетретичным млекопитающим Северного Кавказа. Природа, 3.—Варданянц Л. А. (1937). Вюрмское оледенение бассейнов рек Ираф (Урух) и Цей. Изв. ВГО, 69.—Варданянц Л. А. (1948). Постплиоценовая история Кавказско-Черноморско-Каспийской области. Изд. АН АрмССР, Ереван.—Верещагин Н. К. (1954). К истории фауны позвоночных и развития ландшафтов Ставрополя в неогене. Матер. по изуч. Ставропольск. края, вып. 6.—Громов В. И. (1948). Палеонтологическое обоснование стратиграфии континентальных отложений четвертичного периода на территории СССР. Тр. Инст. геол. наук АН СССР, вып. 64, сер. геол., № 17.—Иванова И. К. (1946). Материалы к стратиграфии травертинов горы Машук в окрестностях Пятигорска. Бюлл. МОИП, отд. геологии, т. XXI, вып. 5.—Колесников В. П. (1931). Геологическое описание южной трети листа Г-3 (Северный Кавказ). Тр. ГГРУ, вып. 124.—Колесников В. П. (1932). Геологическое и гидрогеологическое описание северной части листа Г-4 (Северный Кавказ). Тр. Всесоюз. геол.-развед. объедин., вып. 1.—Колесников В. П. (1933). Геологическое и гидрогеологическое описание листа Г-3 (Северный Кавказ). Тр. Всесоюз. геол.-развед. объедин., вып. 206.—Мирчинк Г. Ф. (1928). Соотношение четвертичных континентальных отложений Русской равнины и Кавказа. Изв. Научно-исслед. инст. 1-го МГУ, т. II, 3—4.—Николаев Н. И. (1948). О возрасте рельефа Центрального Кавказа и Предкавказья. Тр. МГРИ, т. XXIII.—Рейнгард А. Л. (1926). Гляциально-морфологические наблюдения в бассейнах рек Кубани и Кодора на Кавказе летом 1924 г. Изв. ГГО, 58.—Рейнгард А. Л. (1936). Геоморфологический и геологический очерк района ст. Темизбекской. Тр. Азово-Черноморск. геол. треста, вып. 15.—Сафронов И. Н. (1953). Вулканический ландшафт Пятигорья. Матер. по изуч. Ставропольск. края, вып. 5.—Сафронов И. Н. (1954). О некоторых вопросах геоморфологии Черкессии. Матер. по изуч. Ставропольск. края, вып. 6.—Сафронов И. Н. (1955). К вопросу о возрасте террас р. Кубани. Матер. по изуч. Ставропольск. края, вып. 7.—Соколов Н. Н. (1930). Геоморфологический очерк Черкесского округа. Тр. Сев.-Кавк. ассоц. научно-исслед. институтов, № 65, вып. 2, Ростов н/Д.—Тушинский Г. К. (1949). Современное и древнее оледенение Тебердинского района. Ежегодн. сов. альпинизма, Гос. изд. геогр. лит.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . Х

Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К О Е О Б Щ Е С Т В О С О Ю З А С С Р

В. Л. ВИЛЕНКИН

**К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ СОВРЕМЕННОГО РЕЛЬЕФА
ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ СЕВЕРНОГО ПРИАЗОВЬЯ**

Данная работа содержит некоторые основные выводы из геоморфологических наблюдений, произведенных автором в окрестностях городов Жданова и Осипенко (северное Приазовье) летом 1947 и 1951 гг. Особое внимание уделено изучению обвально-оползневых явлений и оврагов в береговом уступе Приазовской равнины.

Основные типы рельефа. Для рассматриваемой зоны северного Приазовья в первом приближении можно выделить следующие основные зоны рельефа (геоморфологические ландшафты).

Слабо увалистая прибрежная равнина. Расчленена длинными пологими балками, неглубокими асимметричными долинами степных рек, текущими к югу и юго-востоку; между последними располагаются широкие и плоские водоразделы. Характерны многочисленные поды и блюдца, в микрорельефе — кротовины. Поверхность равнины слабо наклонена к морю (по И. Н. Лобанову до 2.5 м на 1 км). Она совпадает с поверхностью эвксинской и куяльницкой (киммерийско-куяльницкой) террас (Бондарчук, 1949; Соболев, 1946). Высота южной части прибрежной равнины обычно ниже 50 м, до 25—20 м, над уровнем современной абразии.

Сильно расчлененный оврагами и обвально-оползневыми явлениями береговой уступ. Д. Н. Соболев выделяет здесь уступ одной киммерийско-куяльницкой террасы (1938, 1946). В. Г. Бондарчук (1949) указывает хорошо выраженную древнеэвксинскую террасу; к северу от нее он предполагает наличие куяльницкой террасы. Ниже всех располагаются участки карангатской террасы. Мы берем за основу взгляды В. Г. Бондарчука. Все три террасы представлены в районе г. Жданова, где высота берегового уступа иногда приближается к 50 м (47.5 м). Эвксинская и куяльницкая террасы сильно деформированы оползнями.

Высота основной эвксинской террасы обычно достигает 20—25 м. Она хорошо выражена в окрестностях г. Жданова, затем к западу от Осипенко — в сторону Ногайска. Западнее г. Жданова, к сел. Мелекино, четко представлена куяльницкая (киммерийско-куяльницкая) терраса (высота 35—40 м). Карангатская терраса выражена отдельными участками. Она поднимается на 2—5 м над уровнем абразии, ее максимальная ширина до 1 км (район г. Жданова).

Вторые надпойменные террасы речных долин (Берды, Кальмиуса) не плохо увязываются с эвксинской морской террасой (см. также: Зенкевич, 1946, стр. 160). Берег обрывист, сложно изрезан, имеет лопастевид-

ный облик в плане. Наблюдаем глубоко врезавшиеся крутосклонные овраги, башневидные останцы берегового склона. Повсеместны обвальнo-оползневые цирки различных размеров и заключенные в них наборы сползневых террас; ярко выражены следы обвалов. Прибрежная зона нуждается в искусственном укреплении.

Зона пляжа, прибрежных лагун и кос. Береговой уступ обычно расположен под углом к береговой линии, между ними находится узкая полоса песчано-ракушечного пляжа. Его ширина от 3—4 до 50 м, местами пляж вовсе отсутствует. К этой геоморфологической зоне относятся также песчаные косы северного Приазовья, простирающиеся на многие километры в море (Белосарайская, Бердянская и др.). Лагуны и лиманы образовались в условиях послеледниковoго опускания Приазовья и сопутствующей ему трансгрессии, приведшей к затоплению устьевых частей рек (Соколов, 1895, 1904). Величина опускания в устье р. Кальмиус (район г. Жданова), по И. Н. Лобанову, составляет 25 м.

Деятельность потоков береговых наносов, рек и морских течений привела к формированию песчаных кос, к отделению пересыпями некоторых лиманных заливов от моря и образованию лиманных озер (Бердянское озеро и др.).

Речные долины в устье расширены, обычно реки впадают в лиманы (например, р. Берда в Бердянский лиман). В расширенных устьевых частях рек преобладает отложение аллювия. Реки постепенно заносят своими отложениями лиманы, в которые они впадают. Косы приурочены к резким поворотам берега и обычно расположены против устьевых частей впадающих в море рек (Берды, Мокрой Белосарайки и др.). В плане восточные берега кос выпуклые, западные же вогнутые и окаймляют заливы, лагуны. Косы вытянуты с северо-востока к юго-западу.

Поверхность кос плоская или слабо волнистая, редко поднимается выше 2—3 м над уровнем абразии. В восточной части кос наблюдаются формы эолового рельефа: песчаная рябь, песчаные бугры и дюны. Вдоль берегов тянутся лагуны, отделенные наносными барами.

Оползни и условия их развития. В окрестностях городов Жданова и Осипенко приморская береговая равнина (эвксинская и куяльницкая террасы) заканчивается высоким, сильно расчлененным, крутым уступом высотой в 15—35 м. Он резко поднимается над суженным морским пляжем. В береговом обрыве выражены обширные обвальнo-оползневые цирки, ниже они включают четко выраженные серии древних закрепленных и современных обвальнo-оползневых террас. В пределах Санаторной улицы г. Жданова наблюдаются следы медленного сползания в зоне берегового уступа. Об этом свидетельствуют растрескивание и искривление лестниц, ведущих к морю.

В 1947 г., на основании изучения геологического строения берегового склона, в месте строительства лестницы от дома отдыха коксохимиков к пляжу, можно было констатировать наличие закрепленного древесной растительностью старого оползня, образовавшего две обширные оползневые террасы (рис. 1). В 1951 г. автор посетил этот участок и наблюдал отчетливые следы смещений в виде трещин на ступенях уже построенной к тому времени лестницы. Исключительно яркие следы развития оползневых явлений наблюдаем к западу от городов Жданова и Осипенко. Огромный оползневый цирк с ярусно расположенными оползневыми террасами наблюдается на полпути между селениями Песчаным и Самариной балкой западнее Жданова. К западу от г. Осипенко один из оползней про-

слеживается вдоль берега на 300 м, ширина наиболее значительных оползневых террас достигает здесь 20—25 м, длина до 60 м.

Для выяснения причин оползневых явлений необходимо хотя бы кратко рассмотреть геологическое строение описываемого района.

Докембрийские породы, слагающие Азовский кристаллический массив, в южном направлении погружаются на очень большую глубину. Мощность только неогеновых осадков достигает 300 м, четвертичных — 30 м. Породы эти залегают почти горизонтально. В Ждановском районе на песчано-глинистых верхнесарматских отложениях залегают тонкослоистые понтические известняки. Выше, на глубине около 50 м, встречены киммерийские осадки. На киммерийских песчано-глинистых слоях и глинах лежат перемытые куяльницкие пески, содержащие линзы серо-зеленых глин. Они перерываются красно-бурыми глинами, выходящими кое-где в основании берегового уступа на дневную поверхность (к западу от городов Жданова и Осипенко). Краснобурые глины залегают в основании четвертичной толщи. Это ярко окрашенные пластические глины, содержащие большое количество известковых конкреций и отдельных кристаллов гипса.

Эвксинская терраса в своем основании сложена древнеэвксинскими морскими осадками. Они находятся на глубине примерно 30 м от поверхности, представлены косослойными разнотернистыми песками, суглинками, содержащими фауну моллюсков, типичную для эвксинских осадков. Эти образования, согласно В. Г. Бондарчуку, прослеживаются между г. Ждановым и Белосарайской косой, в районе г. Жданова они залегают на размытой поверхности сарматского яруса.

Выше, в крутых обрывах основной эвксинской и киммерийско-куяльницкой террас, обнажаются послетретичные желтые и бурые лёссовидные суглинки с прослоями песков, в толще которых различимы 2—3 ископаемые почвы. Средняя мощность толщи лёссовидных суглинков в нашем районе (по Крокофу) составляет 18 м.

Наиболее молодая, карангатская, терраса, выраженная к востоку от г. Жданова, сложена песками и черепашечником. Примерно такое же строение имеют наблюдаемые нами здесь косы.

В естественных обнажениях обычно видны породы до красно-бурых глин включительно. В искусственных выемках можно видеть нижележащие зеленовато-серые, надпонтские глины. Нижележащие осадки нигде на поверхность не выходят. Только в районе г. Жданова (ближе к р. Кальмиус) появляются понтические известняки, образующие отчетливую денудационную террасу (Бондарчук, 1931, 1932, 1947, 1949).

Переслаивание глин, песков и песчаников в низах лёссовидной толщи создает исключительно благоприятные условия для развития в прибреж-

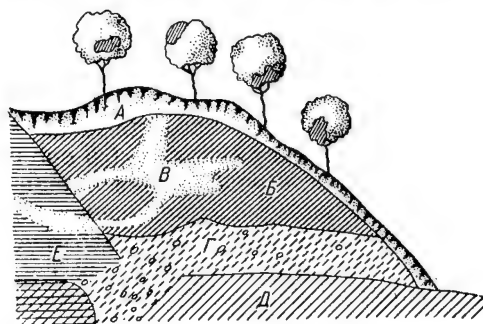


Рис. 1. Схематический разрез через оползневую террасу в г. Жданове. (Сечение через дом отдыха коксохимиков).

А — современная почва (30—120 см.), Б — красновато-бурый лёссовидный суглинок (1—2,5 м), В — прослой известковых конкреций и гипса, Г — красно-бурый, разнотернистый, гравийный, глинистый песок, Д — светло-коричневая („красно-бурая“) глина (видимая мощность около 2 м), Е — серо-зеленая глина.

ной зоне северного Приазовья оползневых явлений. Грунтовые воды просачиваются в песчано-гравийные отложения, покрывающие и подстилающие красно-бурые глины. Наклон водоупорных и водоносных слоев в сторону моря облегчает смещение по ним оползневых масс.

Плоскости скольжения наблюдаемых оползней не обнаруживаются на поверхности и недоступны для непосредственного наблюдения: они покрыты вышележащими породами. На основании опроса старожилов и произведенных наблюдений можно заключить, что формирование оползневых террас представляет довольно длительный процесс.

Перед образованием оползня в краевой части основной террасы появляются дуговидные трещины, намечающие контур будущего оползня. Вначале наблюдается довольно быстрое оседание до нескольких метров выделенного трещинами участка склона. Затем медленно, в течение 5—7 лет и больше, продолжается движение оползневой террасы (или нескольких террас) к подножью оползневого цирка, при этом она обычно деформируется — разбивается трещинами на отдельные призматические участки. Движение оползня увеличивается во время проявления нагонных ветров (низовки), штормов, ледохода, ливневых дождей и т. п.

Оползни толщи лёссовидных суглинков и нижележащих отложений в основном происходят либо по зеленовато-серой (надпонтической) глине, либо по поверхности красно-бурых глин, подстилающих четвертичные осадки. Опасность сползания особенно реальна там, где эти глины выходят на дневную поверхность или залегают вблизи от нее, а циркулирующие над ними грунтовые воды способствуют созданию плоскости скольжения для вышележащей толщи осадочных пород.

В условиях северного Приазовья гораздо реже могут наблюдаться более глубокие плоскости скольжения, ибо глубже лежащие отложения находятся гораздо ниже современного уровня моря. Геоморфологические условия — крутизна коренных склонов и уступов морских и речных террас, подмыв морем оснований крутых берегов — также благоприятствуют оползням. При оползнях вследствие давления оползневых масс на породы, слагающие прибрежную зону, вдоль берега моря наблюдаются пучения морского дна (складки выпирания), прослеживаемые в окрестностях г. Осипенко и в других местах.

Устанавливается связь между развитием оползневых явлений и климатическими условиями Приазовья. Наиболее сильные оползни отмечаются после снежной зимы, в период сменившей ее затяжной весны, когда медленно тают снега. Оползни наблюдаются летом во время или после продолжительных дождей. Количество оползней возрастает в годы с затяжной дождливой осенью (1935, 1939, 1943, 1944, 1951 гг.).

Юго-западные и западные низовые (нагонные) ветры усиливают деятельность моря: происходят срезание морем пляжа и размыв доставленных оползнями рыхлых материалов, что в свою очередь нарушает равновесие грунтовых масс и вызывает усиление обвально-оползневых явлений в зоне берегового уступа.

Наблюдения показывают, что там, где пляж размывает или сильно сужен, наиболее ярко представлены оползни и, напротив, там где он расширяется, заметно ослаблено развитие оползней.

Изучение геологического строения террасовой зоны восточной части Азовского побережья приводит к выводу о реальности угрозы дальнейшего развития оползневой толщи лёссовидных пород по поверхности серо-зеленых и красно-бурых глин. О этом свидетельствует, например, уже упомянутое растрескивание ступеней недавно построенной приморской

лестницы в районе дома отдыха коксохимиков, лестницы, ведущей в городской парк (г. Жданов), и т. д.

Овраги и условия их развития. В мягких лёссовидных суглинках, слагающих береговую уступ северного Приазовья, легко и быстро растут ветвистые овраги, чему также способствуют крутизна берегового уступа, слабо развитый растительный покров и своеобразие климатических условий.

К западу от городов Жданова и Осипенко, в береговом уступе, выражен типичный овражно-балочный рельеф. Представлены большие и мел-

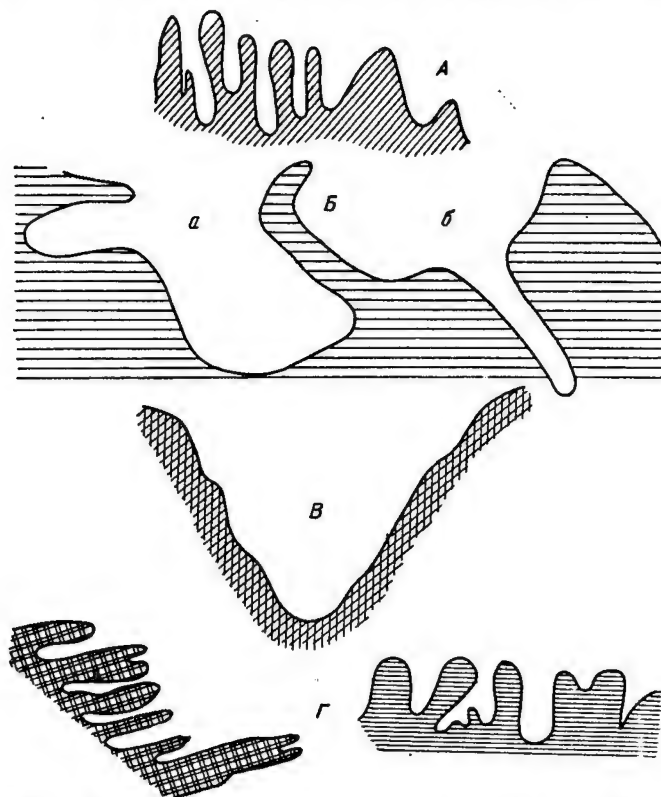


Рис. 2. Обвальнo-овражно-оползневый берег (между Мелекино и Самаринoй балкой).

А — обвальнo-овражно-оползневый берег между Мелекино и Самаринoй балкой (в плане), Б — два оползневые цирка в береговом обрыве (а и б), прорезанные оврагами в Мелекино-Самаринoй балке (в плане), В — деятельный овраг, прорезающий оползневый цирк а (поперечный профиль), Г — обвальнo-овражно-оползневые берега между Песчаным и Мелекино (в плане).

кие крутосклонные овраги. Длина оврагов достигает 60—100 м (район Самаринoй балки), глубина 5—12 м (в редких случаях 20 м), максимальная ширина около 40 м. В склонах выходят желтые и бурые лёссовидные суглинки, переходящие ниже кое-где в красно-бурые глины. В толще суглинков заметны 1—2 ископаемые почвы.

Значительные колебания температур в течение года и суток способствуют усилению трещиноватости пород. Сильные ветры выдувают мелкозем, облегчают возникновение обвалов. Основным преаратором берегового уступа являются атмосферные воды. Они приобретают большую разрушительную силу весной (когда тает снег), во время летних ливней

и длительных обложных осенних дождей. Атмосферные осадки, быстро стекая по слабо закрепленным растительностью склонам, образуют временные водотоки и прорезают в суглинках кругосклонные овраги. Особенно быстро развиваются овраги во время дружной весны, сменившей снежную зиму.

Оползни образуют многочисленные оползневые цирки, которые служат водосборными воронками для возникающих позже оврагов. Эти овраги легко прорезают дно цирков и нижележащие оползневые террасы, сложенные разрыхленными, трещиноватыми лёссовидными суглинками. Одновременное развитие оврагов и оползней обусловило сложные очертания берегового уступа в плане — его лопастевидное строение (рис. 2).

В сравнительно недавнем историческом прошлом побережье Азовского моря и особенно долины рек, впадающих в Азовское море, были значительно более облесены. Об этом свидетельствуют находки под современным аллювием в ряде мест пней вековых деревьев и огромных дубовых стволов (например, в бассейне р. Кальчик). Однако впоследствии эта растительность была уничтожена, что привело к очень быстрому развитию оврагов и балок на данной территории.

В наше время проводится облесение, которое должно вернуть северному Приазовью давно потерянный им живительный покров растительности. Необходимо организовать систематическую посадку деревьев и кустарников в водосборах деятельных оврагов и в зоне берегового уступа Азовского моря. Растительный покров прекратит рост главных вершин и боковых отрогов оврагов, уменьшит интенсивность обвалов.

Морская абразия и борьба с ее последствиями. Наблюдается также тесная взаимосвязь развития оврагов, оползней, обвалов и деятельности морской абразии, преобразующей берег. Морская абразия, усиливающаяся в период бурь и низового юго-западного ветра, подмывает крутые береговые уступы, сложенные рыхлыми лёссовидными суглинками, создает прибойные ниши, способствует обваливанию нависающих карнизов. Следы этих процессов в исследованных районах почти повсеместны (висячие долины, срезанные дороги и т. д.).

В наше время береговая зона Приазовья опускается, море наступает на сушу. В таких условиях особенно активно протекает морская абразия. Морские волны размывают делювий в подошве берегового обрыва, конусы выноса оврагов и этим способствуют уменьшению устойчивости склона, что приводит к дальнейшему развитию обвалов, оползней и оврагов. Абразионная деятельность моря обнаруживает также зависимость от преобладающих ветров и морских течений. Наибольшим постоянством отличаются северо-восточные и восточные ветры. В районе г. Осипенко на них в среднем приходится 46 % наблюдаемых в течение года ветров. Эти ветры могут дуть непрерывно в течение 10—20 дней, а сила их может достигать 40 м/сек. Они вызывают сгон морской воды от берега и нагоняют воду к восточным берегам кос северного побережья Азовского моря (рис. 3). Сильный северо-восточный ветер отгоняет морскую воду от западного берега Бердянской косы на 8—10 м и, наоборот, обуславливает затопление восточного берега косы. В условиях наличия широкой береговой отмели¹ сгонные ветры могут в короткое время отогнать воду от берега на расстояние от 100 м до нескольких километров.

¹ Широкие отмели в пределах взморья представляют абразионную площадку, созданную в лёссовидных суглинках.

На второе место (по степени постоянства) следует поставить юго-западные и западные ветры. В районе г. Осипенко на них приходится весной 25,7%, летом 28% от средних многолетних наблюдений (Спаский, 1949). Юго-западные ветры нагоняя большое количество воды к берегу, ускоряют разрушение последнего. В отдельные исключительные дни берег срезался до 2 метров в течение суток (район сел. Мелекино к западу от г. Жданова).

В мелкой прибрежной зоне Азовского моря наблюдаются резкие колебания уровня моря в связи с пригоном речных вод и главным образом

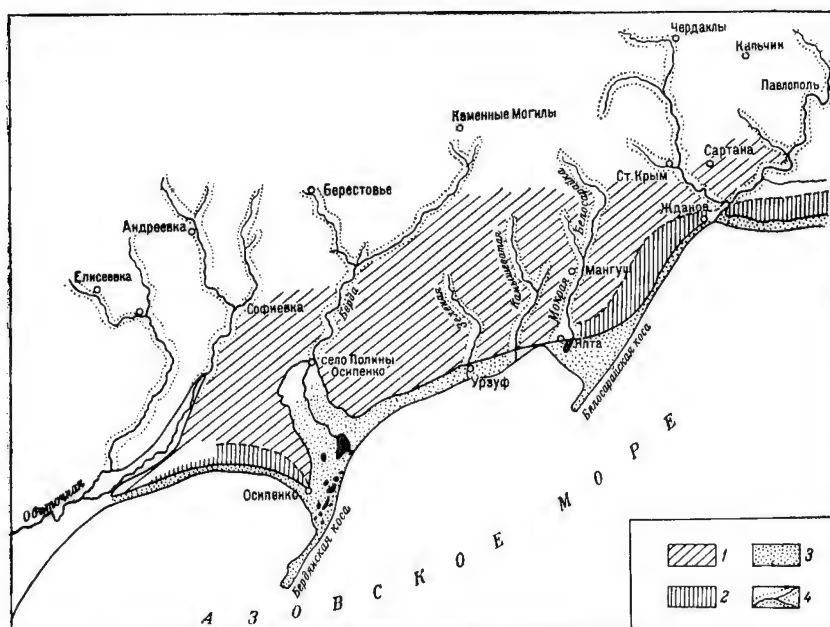


Рис. 3. Типы рельефа Северного Приазовья (береговая зона). Составил В. Л. Виленкин.

1—плоская слабоувалистая прибрежная равнина, 2—обвальнo-овражно-оползневый рельеф берегового уступа, 3—песчанно-лагунная и пляжная зона, 4—речные долины.

в связи с направлением господствующих ветров. Колебание уровня морской воды в Осипенковском заливе составляет 100—140 см, в районе г. Жданова оно возрастает до 202 см. Эти колебания уровня способствуют усилению абразии в прибрежной зоне. Взброс воды в районе г. Осипенко во время бури достигает 5—8 м, при этом вода перемещается до дна.

Помимо основного кругового морского течения, в Азовском море существуют вторичные круговые течения за выступами кос, обусловленные ветрами и являющиеся по самой природе сгонно-нагонными течениями. Скорость их колеблется от 25—30 до 60 см/сек. Эти течения оказывают существенное влияние на формирование побережья и в частности, пляжа.

Сгонно-нагонные явления и вызываемые ими резкие колебания уровня способствуют усилению циркуляции грунтовых вод в прибрежной зоне, что в свою очередь содействует развитию оползневых процессов. Эти явления отражаются на интенсивности речной эрозии в устьевой части рек.

Нагонные морские волны подпирают речные воды. Поздней осенью, когда реки уже покрыты льдом, а на море еще не установился сплошной ледяной покров, сгонные северо-восточные ветры далеко отгоняют воду от берега. Скованные сверху льдами речные воды не могут восполнить убыль морских вод. Эти явления также отражаются на современных рельефообразующих процессах (Самойлов, 1952). Зимой льды, сковывающие прибрежные воды Азовского моря, под влиянием ветров надвигаются на берег и эродировывают его.

Замечено, что песчаные косы уменьшают на некотором расстоянии абразию побережья в зоне волновой тени, что подтверждается многочисленными наблюдениями в районе г. Осипенко и Бердянской косы, в районе Белосарайской косы и участка побережья, расположенного к западу от него. Массовый перенос песков в пределах кос и особенно пляжа, как правило, вызывает усиление абразионного размыва прилежащих к ним участков побережья. В то же время косы должны прерывать поток береговых наносов, движущихся вдоль берега, они должны истощать его. Кроме того, в описываемом районе нет материала, пригодного для образования большого количества гальки. Эти обстоятельства благоприятствуют морской абразии (Зенкович, 1942, 1946; Самойлов, 1952).

Волны, возникающие при нагонных ветрах, встречая песчаные отмели (широко развитые в прибрежной зоне), в значительной мере теряют свою силу и далее направляются к берегу ослабленными; здесь они аккумулируют продукты разрушения берега — песок. Там, где в силу ряда причин площадь таких отмелей сокращена, наблюдается заметное усиление морской абразии и сопутствующих ей явлений.

Поскольку взятие песка в зоне пляжа и кос усиливает разрушительную деятельность абразии, срезающей берег, следует запретить массовую выборку песка в зоне сильно суженного пляжа. Песок можно брать в определенных местах песчаных кос и мысов, там, где это не отразится на степени защищенности берега от абразии.

Плодотворная, вполне оправдавшая себя экспериментальная деятельность научной противооползневой станции в Бзугу (вблизи г. Сочи) открывает возможность использования других путей борьбы с оползнями и обвалами в береговой зоне. Система пневматических волноломов, противоабразионных и противооползневых стенок, каменных бун поможет создать в ряде угрожаемых участков искусственный пляж там, где он отсутствует, либо расширить его там, где он сильно сужен. Аккумулировать пляж, создать отмели смогут при этих условиях существующие здесь прибрежные течения, которые будут отлагать переносимые ими осадки.

Разрушение берега морской абразией протекает параллельно с формированием аккумулятивных форм рельефа песчаных кос и пересыпей. Песчаные косы возникают в устьях рек вследствие наращивания и выдвигания в море речных конусов выноса, часто они связаны с мысами. Наращиванию кос способствуют береговые течения, в частности течения, вызываемые сгонно-нагонными явлениями. Пески, слагающие косы, перевеваются господствующими ветрами, создающими различные эоловые формы рельефа.

Основные выводы

Геоморфологические особенности прибрежной зоны северного Приазовья определены взаимосвязанными процессами денудации и морской абразии, протекающими в условиях сложного проявления колебательных движений и своеобразного геологического строения.

Борьба с последствиями морской абразии должна вестись в нескольких направлениях:

- 1) путем широкого применения противоэрозионного облесения и вообще растительного закрепления склонов и верховьев деятельных оврагов, затем путем создания бетонированных лотков и заборов;
- 2) при помощи поверхностного и подземного дренажа грунтовых вод и временных водостоков (перехват и отвод подземных вод путем прокладки дренажных штолен);
- 3) закреплением подвижных песков кос псаммофитной растительностью;
- 4) запрещением массовой беспорядочной добычи песка в угрожаемых участках побережья;
- 5) устройством искусственных пляжей там, где пляжи слабо развиты;
- 6) путем укрепления береговой зоны противоабразионными вогнутыми стенами, пневматическими волноломами и системой каменных бун;
- 7) наиболее эффективным методом явится, возможно, система коротких «шпор»-бун.

Литература

Бондарчук В. Г. (1931). Каспійські поклади північно-східного узбережжя Азовського моря. Зб. пам'яті Тутковського, т. II. — Бондарчук В. Г. (1932). Четвертинні поклади північно-Приазовщини. Журн. геол.-геогр. циклу АН УРСР, № 8. — Бондарчук В. Г. (1947). Геологічна будова УРСР. Радянська школа. — Бондарчук В. Г. (1949). Геоморфологія УРСР. Радянська школа. — Зенкович В. П. (1942). О выработке берегового профиля. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1. — Зенкович В. П. (1946). Динамика и морфология морских берегов, ч. 1. Волновые процессы. Морской транспорт, М.—Л. — Лобанов И. Н. (1940). Про меотичні відклади... м. Маріуполя. АН УРСР, Геологічний журнал, т. VII, вып. 4. — Самойлов И. В. (1952). Устья рек. Географиз. — Соболев Д. Н. (1938). Неогеновые террасы Украины. Зап. Инст. геол. Харьковск. гос. унив., т. IV. — Соболев Д. Н. (1946). О днепровских и донских плиоценовых террасах. Наукові записки ХГПі, т. IX. — Соколов Н. А. (1889). Общая геологическая карта России, лист 48. Тр. Геол. ком., т. IX, № 1, СПб. — Соколов Н. А. (1895). О происхождении лиманов южной России. Тр. Геол. ком., т. X, № 4, СПб. — Соколов Н. А. (1899). Геологические исследования в южной части Мариупольского уезда Екатеринославской губернии. Изв. Геол. ком., т. 18, СПб. — Соколов Н. А. (1904). К истории причерноморских степей с конца третичного периода. Почвоведение, 6, вып. II, III, СПб. — Спасский К. А. (1949). Азовское море, климат Приазовья и Осипенковского района (материал для школьных и краеведческих экскурсий). Научн. зап. Осипенковск. гос. учит. инст., № 1.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . Х

Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К О Е О Б Щ Е С Т В О , С О Ю З А С С Р

В. С. ВЫШЕМИРСКИЙ и И. П. ВАРЛАМОВ

**РАЗВИТИЕ РЕЛЬЕФА ЗАПАДНОГО ВЕРХОЯНЬЯ
И СМЕЖНЫХ ЧАСТЕЙ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ**

В данной статье рассматривается рельеф трех геоструктурных зон: Западно-Верхоянской мегаантиклинали (средняя часть Верхоянского хребта, примерно, ограничивающаяся рр. Тукуланом и Кобычей), оконтуривающего ее (а также и почти весь хребет) с юго-запада Предверхоянского прогиба и расположенного далее на юг северного склона Алданского щита.

Вопросы геоморфологии западного Верхоянья неоднократно обсуждались в литературе. А. А. Григорьевым (1926) выделены третичные поверхности выравнивания, два пояса конечных морен и две ледниковые террасы. С. С. Ванюшин (1937) рассматривает Верхоянский хребет как нагорье, рельеф которого совершенно не отражает тектонического строения. По его мнению, здесь имеется только одна (верхнетретичная) поверхность выветривания. Оба исследователя большую роль в рельефообразовании отводят сбросам и оледенениям.

Д. М. Колосов (1947; Херасков и Колосов, 1938) предполагал две дочетвертичные фазы поднятия хребта (верхнеюрско-нижнемеловую и предледниковую), разделенные эпохой денудации. Автор выделил ряд горных гряд, совпадающих с антиклиналями 1-го порядка, осложняющими мегаантиклиналь. Какое-либо влияние сбросов на рельефообразование Д. М. Колосовым категорически отрицалось.

Как видно из изложенного, для западного Верхоянья такие вопросы, как количество фаз поднятия хребта, соответствие форм рельефа тектоническим формам, роль дизъюнктивных нарушений в рельефообразовании и ряд других, являются дискуссионными. Что же касается обширной равнинной территории, расположенной к юго-западу от горной области, то геоморфология ее освещена в литературе крайне скудно. По существу имеются лишь весьма краткие описания мелких форм рельефа водораздельных пространств, а также террас р. Лены, причем даже количество последних разными исследователями определяется по-разному.

Геолого-геоморфологические исследования, проведенные авторами данной статьи под руководством проф. А. И. Олли в 1950—1954 гг., дополнили сведения о рельефе этой территории и позволяют по-новому рассматривать историю развития его.

В западном Верхоянье главный водораздел хребта, примерно, совпадает с осью мегаантиклинали, а его склоны — с крыльями. Общими чертами рельефа юго-западного склона являются: грядовой характер вершин, сильная расчлененность эрозионной сетью, имеющей прямоугольно-ветвистое строение, значительная глубина врезания речных долин

(600—1000 м), ступенчатость их склонов, широкое развитие древних ледниковых форм.

Авторами прослежено здесь две денудационные поверхности. Первая представляет собой вершинную поверхность, вторая проходит по более низким (на 200—300 м) вершинам и по террасовидным площадкам на склонах высоких гряд (рис. 1). Первая поверхность выражена очень ясно и прослеживается на всех водораздельных грядах. Вторая менее распространена ввиду частичного срезания ее склонами троговых долин.

На юго-западном крае хребта поверхности выравнивания резко обрываются и переход к прилежащей равнине осуществляется по крутому уступу, прихождение которого многие исследователи связывали со сбро-

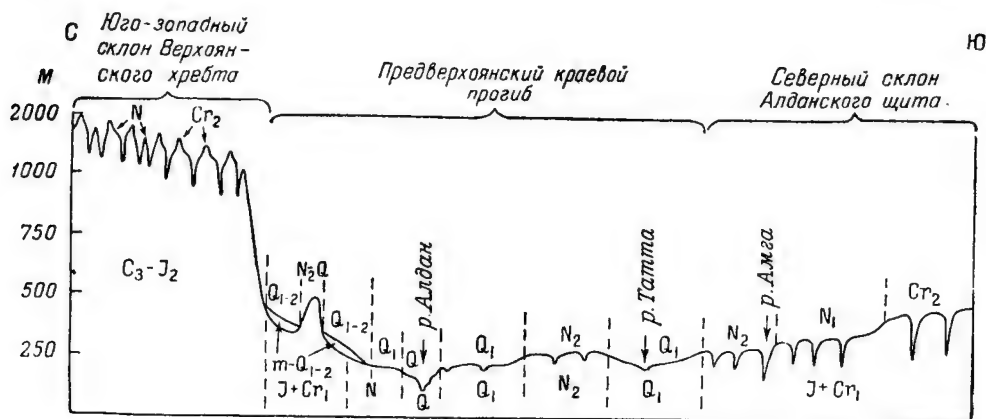


Рис. 1. Схематический геоморфологический профиль от верховьев р. Миля (левый приток р. Алдана) до Алдано-Янского водораздела.

Индексами над профилем показан возраст денудационных поверхностей и аккумулятивных равнин, а индексами под профилем — возраст отложений, выходящих на поверхность.

сами. Таковые позднее были вполне доказаны для Хара-Улаха и восточного Верхоянья (Обручев, 1933). Однако, поскольку геологических данных, непосредственно свидетельствующих о сбросах, в западном Верхоянье известно не было, мнение Н. П. Хераскова и Д. М. Колосова (1938) об отсутствии здесь крупных дизъюнктивных нарушений получило почти всеобщее признание. Лишь в 1950—1951 гг. В. С. Вышемирским севернее устья р. Алдана, на юго-западном крае хребта, по двум пересечениям наблюдалось сочленение по сбросу разновозрастных пород. В одном случае на один уровень со средней частью верхней юры выведена средняя часть нижней юры, в другом — верхи последней. В первом случае амплитуда сброса составляет 2000 м, во втором — 1300—1500 м. Опущенное крыло сброса юго-западное. Сброс сечет складки под острым углом и точно совпадает с краевым уступом хребта. Таким образом, идея С. В. Обручева (1938) о сбросовом ограничении Верхоянского хребта подтверждается и для западного Верхоянья. В. С. Вышемирским закартированы два столь же крупных сброса и в пределах самого хребта, но эти сбросы совершенно не выражены в современном рельефе.

Предверхойянский краевой прогиб расчленяется на две зоны (Вахрамеев и Пушаровский, 1952): внутреннюю (пригеосинклинальную) и внешнюю (приплатформенную). Внутренняя зона более приподнятая. Она характеризуется наличием крупных антиклиналей, примерно, парал-

лельных хребту и разделенных корытообразными депрессионными участками. Антиклиналы отчетливо выражены в рельефе предгорными грядами с относительной высотой 200—500 м, а депрессионные участки — ледниковой аккумулятивной равниной, уходящей на юго-запад, во внешнюю зону прогиба, вплоть до правых склонов долин Лены и Алдана (рис. 1 и 2). На левобережьях этих рек ни ледниковых отложений, ни каких-либо других следов ледниковой деятельности не наблюдается.

По взаимоотношениям ледниковых и аллювиальных отложений, выясненных авторами, фиксируются две фазы оледенения. На юго-западе ледниковой равнины моренные отложения частично перекрывают IV надпойменную террасу р. Лены, лишь местами доходя до ее уступа. Западная часть этой террасы, не покрытая мореной, с поверхности переработана ледниковыми водами. Она прорезана ложбинами стока ледниковых вод с цепочками озер, а аллювиальные отложения ее с поверхности перебиты и содержат крупные валуны, видимо, ледникового происхождения. На левобережье р. Лены на IV террасе нет ни ложбин, ни валунов. Нет их также и на других террасах обоих склонов.

Эти взаимоотношения, отчетливо выраженные на правобережье р. Лены ниже устья р. Вилюя, свидетельствуют о том, что первое оледенение имело место после образования IV террасы р. Лены, но до образования III террасы. Данный вывод подтверждается также и тем, что во внутренней зоне прогиба на многих реках моренные отложения слагают цоколь III надпойменной террасы. Конечно-моренная гряда второго оледенения прослеживается в пределах юго-западного склона хребта, а севернее — во внутренней зоне прогиба, по днищам некоторых троговых долин. Здесь моренные отложения местами перекрывают III надпойменную террасу правых притоков Алдана и Лены, нигде не спускаясь на более низкие террасы. Нет их и в цоколях террас. Следовательно, второе оледенение было после образования III террасы, но до образования II террасы. Как правило, на моренной равнине фиксируется одна цепь конечно-моренных гряд. Однако местами, например в районе р. Тумары, ясно выражены две гряды, в чем Д. М. Колосов и другие усматривают следы двух фаз оледенения, считая конечно-моренную гряду в пределах юго-западного склона хребта образованием уже третьей фазы.

По нашему мнению, две конечно-моренные гряды в пределах моренной равнины образовались в одну фазу оледенения и свидетельствуют лишь о стадиях отступления ледника, что подтверждается следующими данными: 1) образование обеих гряд приурочено к узкому стратиграфическому интервалу (между IV и III террасами); 2) если на моренной равнине проявились бы две фазы оледенения, то мы имели бы здесь две моренные толщи, разделенные озерно-аллювиальной, чего никем не наблюдалось; 3) вторая конечно-моренная гряда не имеет значительного распространения; 4) моренная равнина повышается в сторону гор весьма плавно, без каких-либо перегибов.

Значительная часть внешней зоны Предверхоанского прогиба занята долинами рр. Алдана (нижнее течение) и Лены (ниже устья р. Алдана), в которых прослеживается 4 надпойменные и 2 пойменные террасы (рис. 2). Последние имеют относительные высоты в 2—4 и 6—8 м. Поверхность I надпойменной террасы возвышается над руслом на 9—12 м, II — на 15—20 м, III — на 35—60 м и IV — на 90—120 м. Пойма, I и II надпойменные террасы развиты сравнительно слабо, а III и IV — очень широко, причем последняя на левобережьях повсюду цокольная, а на правобережьях — в основном аккумулятивная. Все террасы

выделяются вполне ясно по уступам, характеру поверхности и слагающим их отложениям.

Поверхность IV террасы плоско-волнистая, осложненная неглубокими балками и озерно-болотными котловинами термокарстового происхождения. Местами приуступная часть террасы осложнена эоловыми холмами и валами. Поверхности других надпойменных террас плоские, заболоченные. На III террасе широко развиты крупные (2—5 км, реже до 10 км) термокарстовые озера с различными урезами воды. На II террасе имеются озера и термокарстового и старичного происхождения. Они меньших размеров и встречаются реже, чем на более высоких террасах. Озера I террасы преимущественно старичного происхождения.



Рис. 2. Схема соотношения четвертичных отложений в долине р. Лены ниже устья р. Вилюя.

1 — аллювиальные отложения, 2 — моренные отложения, 3 — дочетвертичный цоколь.

В отложениях III надпойменной террасы р. Лены В. П. Чернышковым (Саратовский государственный университет), наряду с другой фауной, найден *Bison priscus* aff. *longicornis* W. Grön., характерный, по мнению В. П. Громова, определявшего эту фауну, для второй половины среднего плейстоцена. IV терраса прислоняется к плиоценовым отложениям и местами содержит их в цоколе. Исходя из этих данных, мы индексируем террасовые отложения следующим образом: I — Q_3^2 , II — Q_3^1 , III — Q_3^2 , IV — Q_1 . В соответствии с этим возраст первого оледенения определяется как Q_1^2 — Q_3^1 , а второго — Q_2^2 — Q_3^1 , т. е. несколько древнее, чем по схеме В. Н. Сакса (1952), считающего III надпойменную террасу верхнеплейстоценовой. Что касается третьего (сартанского) оледенения, то оно, по-видимому, имело место лишь на крайнем севере.

На крупных притоках Лены и Алдана прослеживается до трех надпойменных террас, которые в нижних течениях переходят в одноименные террасы главных рек. Относительная высота террас вверх по притокам постепенно уменьшается. В приплатформенной части Предверхоянского прогиба, расположенной к юго-западу от долин Лены и Алдана, И. П. Варламовым выделены две аккумулятивные равнины (рис. 1). Нижняя с поверхности сложена нижнечетвертичными озерно-аллювиальными отложениями мощностью порядка 80 м, залегающими с разрывом на плиоцене. Абсолютные отметки ее снижаются с юга на север от 240—250 до 200—220 м. Верхняя с поверхности сложена плиоценовыми озерно-аллювиальными отложениями мощностью 100—150 м. Абсолютные отметки ее снижаются с юга на север от 280—290 до 250—260 м.

Нижнечетвертичная аккумулятивная равнина плоская, со слабым врезом (15—25 м) и малой густотой речной и балочной сети, с ледяными буграми (гидролакколиты) и большим количеством крупных озерных котловин. Склоны речных долин пологие, не более как с 1—2 надпоймен-

ными террасами. Плиоценовая аккумулятивная равнина плоско-волнистая. Она отличается большей густотой эрозионной сети, большей глубиной врезания долин (25—35 м) и меньшим развитием озерно-болотных котловин. Подавляющее большинство последних включено в эрозионную сеть.

Нижнечетвертичная аккумулятивная равнина на западе и севере ограничена долинами рр. Лены и Алдана, а на востоке и юго-востоке денудационными поверхностями. Плиоценовая аккумулятивная равнина расположена южнее, вдаваясь на север вглубь нижнечетвертичной равнины неширокой полосой северо-восточного простираения, являющейся здесь водоразделом Лены, Алдана и Амги. В нижнем течении Алдана, на гипсометрическом уровне нижнечетвертичной аккумулятивной равнины, сплошь развиты плиоценовые огложения, что свидетельствует о нижнечетвертичной денудации этого участка, совпадающего с крупной широтной складкой.

К югу от аккумулятивных равнин, т. е. в пределах северного склона Алданского щита, междуречные пространства сложены исключительно мезозойскими (а далее на юг и кембрийскими) породами; рельеф здесь денудационный: плоско- и грядово-холмистый. Термокарстовые озера встречаются только в речных долинах. Здесь И. П. Варламовым выделено три разновозрастные денудационные поверхности, последовательно сменяющие друг друга с севера на юг (рис. 1). На низких (более северных) поверхностях имеются останцы (на профиле не показаны) более высоких. Все поверхности ограничены ясно выраженными склонами и слабо наклонены на север. Абсолютные высоты нижней поверхности равны 280—300 м, средней — 340—380 м и верхней — 420—440 м.

Все денудационные поверхности расчленены сравнительно густой сетью глубоко врезанных (от 60—80 до 160—180 м) речных и балочных долин с сильно террасированными склонами. Так, на рр. Ноторе, Миле и других наблюдалось до 4 надпойменных террас. Для высоких поверхностей характерна большая глубина врезания речных и балочных долин. Возраст нижней денудационной поверхности, очевидно, плиоценовый, поскольку она по высоте примерно соответствует плиоценовой аккумулятивной равнине и к ней прислоняется нижнечетвертичная аккумулятивная равнина.

Несмотря на то, что мезозойский разрез в пределах Западно-Верхоянской мегаантиклинали заканчивается средней юрой, мы полагаем, что поднятие хребта началось только в конце нижнего мела. В пользу этого свидетельствует согласная дислоцированность в пределах Предверхоянского прогиба всех мезозойских отложений до нижнего мела включительно, а также тонкопесчаный состав имеющихся здесь верхнеюрских и нижнемеловых отложений. Галечный материал в более или менее заметном количестве появляется лишь в верхах нижнего мела. Что же касается отсутствия этих отложений в пределах хребта, то оно, по-видимому, объясняется более поздним размывом.

В верхнемеловое время хребет и предгорья (внутренняя зона прогиба) интенсивно поднимались, подвергаясь при этом расчленению, а затем (при затухании восходящих движений) денудации. Судя по возрасту отложений, выходящих на верхнюю поверхность выравнивания на разных участках юго-западного склона хребта, поднятие было сводовым, амплитудой до 6000 м. Движение по сбросам, оконтуривающим хребет, было сравнительно небольшим. Большая часть амплитуд этих сбросов падает на более позднее время. Что же касается сбросов, закартированных

в пределах самого хребта, то они, вероятно, целиком сформировались в верхнемеловую эпоху, поскольку они не отражены даже в форме верхней поверхности выравнивания.

Терригенный материал, выносившийся из хребта и предгорий, отлагался во внешней зоне Предверхоянского краевого прогиба и прилежащих участках Вилюйской синеклизы, где формировалась аккумулятивная равнина. Судя по тому, что нижняя часть верхнемелового разреза представлена грубозернистыми песками с большим количеством валунно-галечного материала верхоянского происхождения, есть основание полагать, что в начале верхнемелового времени западное Верхоянье имело горный облик. Более тонкий материал в верхах верхнемелового разреза, по-видимому, свидетельствует о процессах пенепленизации западного Верхоянья. К началу третичного времени эти процессы были, очевидно, в основном закончены, поскольку палеогеновых отложений по существу нет ни в Предверхоянском прогибе, ни на прилежащих территориях. К этому времени рельеф западного Верхоянья стал плоскохолмистым и вся территория его представляла собой единый пенеплен.

В верхнем мелу подвергались денудации и значительные районы платформы, галечный материал с которых также имеется в верхнемеловых отложениях Предверхоянского прогиба. В связи с этим верхнюю денудационную поверхность северного склона Алданского щита мы с некоторой долей условности считаем верхнемеловой. К этому времени относится, вероятно, и возникновение палео-Лены, фиксирующей ниже устья р. Вилюя, в районе современного русла р. Лены. Здесь, на левом берегу р. Лены, верхнемеловые отложения обладают ясно выраженной косо́й слоистостью речного типа. Судя по грубозернистости песков, линзообразному залеганию их и характеру косо́й слоистости, это, вероятнее всего, русловые отложения. С удалением в обе стороны от р. Лены верхнемеловые отложения становятся более разнообразными в фациальном отношении. Здесь значительное место занимают озерные фации с менее сложной слоистостью, с линзами алевролитов и глин, тогда как типично русловые отложения наблюдаются реже.

На правобережье р. Лены в верхнемеловых отложениях развит галечный материал исключительно верхоянского происхождения, а на левобережье — в основном платформенного и лишь частично верхоянского. Массовые замеры ориентировки косо́й слоистости в верхнемеловых отложениях свидетельствуют о преобладании на левом берегу р. Лены северных и на правом берегу северо-западных течений. Максимальные наклонь слейков наблюдаются на левом берегу р. Лены.

Исходя из всех перечисленных данных, мы полагаем, что верхнемеловая аккумулятивная равнина была озерно-аллювиальной. Главная артерия ее (палео-Лена) протекала с юга на север, примерно, в районе современной р. Лены.

В неогеновое время Предверхоянский прогиб вновь испытал значительное погружение. Здесь накопилась мощная толща терригенных пород миоцена и плиоцена, сформировалась плиоценовая, озерно-аллювиальная, аккумулятивная равнина. По-видимому, к этой эпохе относятся второе поднятие Верхоянского хребта, расчленение верхней поверхности выравнивания и образование нижней. Судя по разности в высотах поверхностей, амплитуда поднятия была небольшой (порядка 300 м). Однако в миоцене и начале плиоцена рельеф обладал значительной контрастностью. Об этом говорит грубокластический состав соответствующих

отложений в области прогиба. В конце плиоцена здесь накапливались преимущественно глинисто-алевритовые отложения, свидетельствующие о выравнивании в области хребта. Поскольку здесь имеются останцы верхнемеловой поверхности, надо полагать, что в неогеновое время хребет не был целиком пенепленизирован.

Северный склон Алданского щита в неогеновое время также подвергся поднятию, эрозионному расчленению и денудации. Здесь имеется плиоценовая денудационная поверхность, расположенная на 140—160 м ниже верхнемеловой, что свидетельствует об амплитуде поднятия этой территории. Однако между этими поверхностями есть еще одна денудационная поверхность. По характеру расчлененности и высоте она ближе к плиоценовой. Поэтому мы условно относим ее к миоцену.

По-видимому, северный склон Алданского щита в неогеновое время испытал два цикла денудации, почти полностью переработавших верхнемеловую поверхность. Это хорошо увязывается с составом неогеновых отложений прогиба: грубокластический материал наблюдается в низах миоцена и плиоцена, а более тонкий — в верхах обоих этих отделов. Не исключена возможность того, что так же было и на Верхоянском хребте, но в виду горного облика этого района нам не удалось проследить обеих неогеновых поверхностей выравнивания. С другой стороны, одна из них могла оказаться уничтоженной. Более развитой и яснее выраженной должна быть, по-видимому, плиоценовая поверхность выравнивания, соответствующая плиоценовой же аккумулятивной равнине прогиба.

В самом конце плиоцена и начале нижнечетвертичного времени вся описываемая территория испытывала поднятие, интенсивное вертикальное и плановое расчленение рельефа, что обусловило частичную переработку древних денудационных поверхностей и аккумулятивных равнин. Во внешней зоне прогиба вследствие поднятия контрастность рельефа, судя по превышению плиоценовой аккумулятивной равнины над плиоценовым цоколем нижнечетвертичной аккумулятивной равнины, достигала порядка 130 м. Северный склон Алданского щита испытал несколько большее поднятие, о чем свидетельствует более высокое положение плиоценовой денудационной поверхности. Судя по превышению неогеновой поверхности хребта над цоколем ледниковой равнины прилежащих участков прогиба, а также по глубине врезания троговых долин, Верхоянский хребет был приподнят, примерно, на 700 м. Наличие резко выраженного краевого уступа хребта, совпадающего со сбросами, и незначительное (порядка $0^{\circ}40'$) воздымание поверхностей выравнивания в сторону оси хребта (в значительной мере, очевидно, первичное) свидетельствуют о глыбском характере поднятия.

Мощное поднятие всего северо-востока СССР, в том числе и Верхоянского хребта, как отмечалось многими исследователями, создало условия для последующих оледенений. Вслед за поднятием во внешней зоне Предверхоянского прогиба развивается погружение, накапливается 80-метровая толща нижнечетвертичных отложений, формируются обширная аккумулятивная равнина и аккумулятивные террасы Лены и Алдана. Северный склон Алданского щита переживал депрессионное состояние, на что указывает незначительная мощность аллювиальных отложений на цоколе IV террасы.

В конце нижнечетвертичного и начале среднечетвертичного времени вся описываемая территория вновь испытала поднятие. На северном склоне Алданского щита и во внешней зоне прогиба оно составляло, судя по превышению IV террасы над цоколем III, не менее 120 м. Взаимо-

отношение высоких и низких трогов в пределах хребта говорит о том, что поднятие здесь едва ли было интенсивным. К этому времени относятся достижение ледниками, выходившими из гор, долин Лены и Алдана и перекрытие ими тыловой части IV надпойменной террасы. Во вторую половину среднечетвертичного времени погружение (в прогибе не менее 70—80 м) вызвало аккумуляцию аллювиальных отложений III террасы. В конце среднечетвертичной эпохи фиксируется (по террасам) новое поднятие и второе оледенение. В верхнечетвертичное время было два цикла колебательных движений, обусловивших формирование II и I надпойменных террас.

Взаимоотношения форм рельефа с тектоническими формами рассматриваемой территории сложны и разнообразны. Тем не менее почти все тектонические элементы, зафиксированные при геологической съемке, ясно выражены геоморфологически. Значительно приподнятая область Верхоянского хребта характеризуется среднегорным, эрозивно-денудационным рельефом, а менее приподнятая — северный склон Алданского щита — равнинным, денудационным. Для погруженной области Предверхоянского прогиба типичен аккумулятивный рельеф и сравнительно низкие абсолютные высоты (рис. 1). К внешней зоне прогиба, испытавшей в верхнем мелу и кайнозое наибольшее погружение, приурочены долины рр. Лены и Алдана. На левобережьях их, тяготеющих к типичной платформе, IV надпойменная терраса цокольная, а на правобережьях, обращенных внутрь прогиба, почти везде аккумулятивная (рис. 2). Долина Лены достигает максимальной ширины именно в наиболее погруженной части прогиба (ниже устья р. Вилюя). Высоты надпойменных террас здесь заметно уменьшаются, а мощность аллювия на цоколе IV террасы возрастает до 20—25 м, тогда как в районе г. Якутска она падает до нуля. Во внутренней зоне прогиба, как уже отмечалось рядом исследователей, все крупные антиклиналы выражены предгорными грядками, а депрессионные участки — ледниковым аккумулятивным рельефом. Террасы рек в пределах гряд преимущественно эрозионные и цокольные, а в междугрядьях — аккумулятивные.

На юго-западном склоне хребта, т. е. в области сплошной складчатости, взаимосвязь горных гряд с антиклиналями выражена менее ясно, вследствие чего она рядом исследователей совершенно отрицается (Ванюшин, 1937, и др.). Полное соответствие гряд антиклиналям наблюдается здесь сравнительно редко. Обычно антиклиналы 1-го порядка лишь примерно совпадают с грядками, а гребни последних зачастую приурочены к антиклиналям 2-го порядка. По-видимому, неравномерный рост антиклиналей 2-го порядка в период заложения гидрографической сети (очевидно, еще в верхнем мелу) в совокупности с влиянием литологического фактора привел к образованию водоразделов на складках, в настоящее время расположенных не на сводах антиклиналей 1-го порядка, а в присводовых частях их. Иногда горные гряды приурочены к крыльям, но в этих случаях они менее резко расчленены и несколько ниже других гряд, что отражает изгибы поверхностей выравнивания, согласующиеся с крупными тектоническими формами.

Все крупные реки юго-западного склона хребта пересекают гряды почти под прямым углом, но несмотря на это, они самым тесным образом связаны с тектоническими элементами. Во-первых, направление этих рек вполне согласуется с региональным наклоном (с юго-западным крылом мегаантиклиналей), во-вторых, они пересекают горные гряды в местах

значительного (порядка 1—1.5 тыс. м) и довольно резкого погружения осей складок. Например, в месте пересечения р. Тумарой первой горной гряды гребень последней сложен нижнеюрскими отложениями, а в 8—10 км к западу и востоку — верхнепермскими. Притоки крупных рек большей частью заложены в синклиналях и лишь некоторые — в присводовых частях антиклиналей, но в таких случаях долины их узкие, а террасы преимущественно эрозионные и цокольные.

Наряду с перечисленными общими признаками рельефа, прослеживается большое количество частных признаков, ярко свидетельствующих о тесной связи тектоники с рельефом и об унаследованности неотектоникой более древних тектонических форм. Так, буквально все зоны поднятий, в том числе и локальных, характеризуются увеличением уклона рек на 30—40% (а в горной части до 200%), большей высотой III надпойменной террасы (иногда вдвое), а на рр. Лене и Алдане и IV террасы (на 10—30 м).

В зоне хребта и предгорий на всех антиклиналях наблюдается повышенное положение «коренного» дна рек, ясно фиксирующееся по русловому стоку и наледям. В синклинальных участках значительная часть воды фильтруется сквозь мощные галечники (подрусловый сток), тогда как в русле воды немного, а временами и совсем нет. На антиклинальных участках мощность русловых галечников небольшая, в русле нередко выходят коренные породы, иногда образующие острова, даже надпойменные. Реки на этих участках более водообильные.

Наши наблюдения вполне подтверждают данные Д. М. Колосова о том, что гигантские русловые наледи образуют в местах неглубокого залегания «коренного» дна. С другой стороны, почти все наблюдавшиеся нами наледи либо приурочены к сводам антиклиналей, либо расположены в присводовой части выше по реке, что дает основание считать наледи геоморфологическим признаком тектонических форм. Однако часть наледей приурочена к сбросам, например, к краевым сбросам хребта, что подтверждает идею П. Ф. Швецова (1941) о питании гигантских наледей за счет подмерзлотных вод.

Литература

- Ванюшин С. С. (1937). Физико-географический очерк Западно-Верхоянского рудного района Якутской АССР. Изв. ГГО, т. 69, вып. 5.—Вахрамеев В. А. и Ю. М. Пущаровский. (1952). Новые данные о геологическом строении Вилюйской впадины и Приверхоянского краевого прогиба. ДАН СССР, т. 1, XXXIV, № 2.—Григорьев А. А. (1926). Геология, рельеф и почвы северо-западной части Лено-Алданского плато и Верхоянского хребта по данным экспедиции 1925 г. Матер. Ком. по изуч. ЯАССР.—Колосов Д. М. (1947). Проблемы древнего оледенения северо-востока СССР. Тр. Горно-геол. упр. Главсевморпути, вып. 30.—Обручев С. В. (1933). Индигирская экспедиция 1926 г. т. II. Тр. Всесоюз. геол.-развед. объедин., вып. 229.—Обручев С. В. (1938). Очерк тектоники северо-восточной Азии. Сб. «Акад. В. А. Обручеву», т. 1.—Сакс В. Н. (1952). Опыт восстановления истории развития Сибири в четвертичный период. Матер. по четверт. периоду СССР, вып. 3.—Херасков Н. П. и Д. М. Колосов. (1938). Геология и геоморфология западного Верхоянья. Тр. Всесоюз. инст. минер. сырья, вып. 116.—Швецов П. Ф. (1941). Гигантские наледи в северо-восточной части ЯАССР. Тезисы докладов на конференции по развитию производительных сил ЯАССР. Изд. АН СССР.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . Х
 Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К О Е О Б Щ Е С Т В О С О Ю З А С С Р

Н. П. КРАЙНЕР

**РУССКИЕ ГЛЯЦИАЛИСТЫ — ПРЕДШЕСТВЕННИКИ
 П. А. КРОПОТКИНА**

За последнее время в нашей геологической и географической литературе появились работы, в которых утверждается, что прямыми, непосредственными предшественниками творца учения о ледниковом периоде, П. А. Кропоткина, были известные зарубежные катастрофисты: Ж. Кювье, Л. Агассиц, В. Беклэнд, К. Шимпер и др. Именно такой точки зрения придерживается палеонтолог И. Г. Пидопличко, изложивший ее сначала на дарвинской сессии Академии наук УССР в 1939 г. и в «Докладах Академии Наук СССР» в 1940 г., а затем в ряде работ и выступлений на различных научных конференциях. Не встретив на этот счет должной критики в нашей печати, если не считать кратких замечаний К. К. Маркова (1955), И. Г. Пидопличко развивал и поныне продолжает упорно отстаивать этот взгляд в своих статьях и книгах, посвященных ледниковому периоду. Так, в недавно вышедшем сборнике «О климатах и ландшафтах прошлого» (1955), написанном совместно с П. С. Макеевым, касаясь значения трудов П. А. Кропоткина по истории четвертичного периода, И. Г. Пидопличко отмечает, что «он (П. А. Кропоткин, — Н. К.) воскресил в резко догматическом виде ледниковую гипотезу, созданную западноевропейскими учеными Ж. Кювье, Л. Агассисом, В. Беклэндом и другими катастрофистами».

Исходя из этого, И. Г. Пидопличко делает вывод: поскольку учение о ледниковом периоде создано зарубежными катастрофистами в начале XIX столетия, то оно является «катастрофистским, следовательно, идеалистическим» (стр. 108), т. е. учением, неприемлемым для нашей советской науки. В действительности, ознакомление с историей развития геологических и географических знаний в России показывает, что не только дрифтовая гипотеза (Ломоносов, Лепехин, Соколов, Арсеньев, Шуровский и др.), но и ледниковая теория имеют давнюю традицию в нашей отечественной науке. В этом нетрудно убедиться, если обратиться к исследованиям и высказываниям наших известных ученых К. М. Бэра, К. Ф. Рулье и Н. А. Северцова. Все они не только решительным образом отвергли катастрофизм как теорию, но и, успешно преодолев односторонность в толковании геологических событий четвертичного периода, свойственную сторонникам дрифтовой гипотезы, стали на правильный, научный путь изучения и объяснения причин образования ледниковых явлений прошлого Земли.

Возьмем в качестве примера «Автобиографию» (1950)¹ академика К. М. Бэра (1792—1876). Из нее мы узнаем, что в промежуток времени

¹ Первоначально «Автобиография» К. М. Бэра была издана на немецком языке Академией наук в 1865 г.

между путешествием в 1837 г. на Новую Землю и посещением в 1840 г. восточного и северо-восточного берегов Русской Лапландии, Бэр совершил поездку через южную Финляндию до Гельсингфорса. Во время этой поездки ему «невольно бросились в глаза ледниковые шрамы и отполированные места на местных скалах». При низком положении солнца путешественник увидел «плоский и низкий купол (бараний лоб,— Н. К.), который... весь был покрыт темными полосами и выглядел, как шкура зебры» (стр. 413).

Когда Бэр стал внимательно рассматривать эти интересные явления, то оказалось, что «по скале проходят параллельные отшлифованные борозды в несколько дюймов шириной каждая». Эти борозды в момент наблюдения были «в тени и чередовались с освещенными гребнями».

Яснее всего подобную картину Бэр видел «на вершинах плоских скалистых кражей, иногда же и на более острых гребнях» (стр. 413). Эти наблюдения пробудили у ученого глубокий интерес к этому предмету и позднее он еще несколько раз посетил страну классических ледниковых явлений четвертичного периода — Финляндию.

Чтобы убедиться в том, что ледниковые явления Финляндии, равно как и подобные явления северо-западной части европейской России, имеют ледниковое происхождение, а также для того, чтобы получить представление о переносе валунов плавающим морским льдом, деятельностью которого Ляйель и другие объясняли образование ледниковых явлений четвертичного периода, Бэр в 1839 г. предпринял интересную поездку на острова Финского залива. Хотя Бэр и получил от местных жителей сведения о целом ряде случаев перенесения крупных валунов плавающими льдинами, а транспортировка более мелких, является, по их заявлениям, очень частым явлением, он правильно заключил, что «наличие значительных и многочисленных нагромождений крупных валунов, которые в море располагаются даже слоями, говорят больше в пользу деятельности глетчеров», чем плавающих льдин (стр. 414).

Пока ученик Бэра, А. Ф. Миддендорф, готовился к своему путешествию по Сибири, Бэр совместно с ним успел совершить одну специальную поездку в Финляндию (в окрестности Гельсингфорса) с тем расчетом, чтобы показать Миддендорфу на месте ледниковые шрамы и отполированные поверхности на скалах, которые, по убеждению Бэра, Миддендорф должен был встретить в Сибири. Надежда Бэра, как известно, не сбылась; ни изборожденных, ни отполированных скал в Сибири Миддендорфу встретить не удалось. А это, как совершенно верно заметил в то время Бэр, было очень важно для окончательного решения проблемы о ледниковом периоде, ибо «до тех пор, пока не удастся выяснить, почему они отсутствуют в Сибири, проблема древнего ледникового времени остается еще не полностью решенной» (стр. 415).

Эти извлечения из «Автобиографии» Бэра позволяют сделать вывод, что первым русским географом-гляциалистом, придерживавшимся ледниковой гипотезы задолго до ее общего признания, был не Э. И. Эйхвальд, как считал Г. И. Танфильев (1916) и продолжают считать многие современные исследователи, а К. М. Бэр.

Но этим не исчерпываются заслуги К. М. Бэра в истории гляциологии. К числу их нужно отнести и тот немаловажный факт, что он первый указал на Сибирь как на пробный камень ледниковой гипотезы и тем самым

обратил внимание исследователей на необходимость поисков там ледниковых явлений для полного решения «проблемы древнего ледникового времени». Надо также указать на необходимость дальнейшего изучения работ академика Бэра, касающихся гляциологии, тем более что некоторые из них до сих пор не потеряли своего значения.

Значительный интерес к наблюдениям К. М. Бэра проявлял П. А. Кропоткин. В своей монографии «Исследования о ледниковом периоде» (1876) он в ряде мест ссылается на работы Бэра, особенно в главе XVII («Валуны») второго (неопубликованного) тома. Кропоткин, отправляясь в Сибирь, по существу, следовал пожеланию Бэра относительно выяснения наличия там признаков древнего оледенения для решения проблемы о ледниковом периоде. При этом, открыв следы четвертичного оледенения Восточного Саяна и Патомского нагорья и доказывая распространение ледниковых явлений на Сибирь, Кропоткин истолковывал их образование не с катастрофической точки зрения, как представляется И. Г. Пидопличко, а с актуалистической позиции. Причину древнего оледенения Сибири Кропоткин усматривал в более влажном ее в сравнении с современным климате, обусловленном затоплением Барабинской степи, Северно-Сибирской, Средне-Амурской и Нижне-Амурской низменностей и Чилийской провинции, вызванным «погружением материка». Некоторое смягчающее влияние на климат оказывало, по его мнению, и огромное количество озер, ныне либо высохших, либо обратившихся в плодородные аллювиальные равнины (1868, стр. 114; 1873, стр. 282).

Достоинны внимания и наблюдения В. Бётлингга, проведенные в 1839—1841 гг. над обработкой древними ледниками поверхности твердых, преимущественно изверженных горных пород в Швеции, Финляндии, Лапландии и на Кольском полуострове, поскольку они не оставляли никаких сомнений в том, что поверхность упомянутых стран, включая и Кольский полуостров, была покрыта мощным ледниковым покровом (Карлов, 1953). На эти наблюдения ссылается П. А. Кропоткин в своем труде «Исследования о ледниковом периоде» (1876).

В 50-х годах глубокие суждения о происхождении эрратических валунов высказывал профессор Московского университета К. Ф. Рулье (1814—1858). В одной из своих публичных лекций, читанных в 1851 г. в Московском университете, Рулье (1852) говорил: «Под конец третичной эпохи, когда климаты распались, северо-запад России и Скандинавии был покрыт снегами и льдом, делавшими невозможною жизнь растений и животных. От причин, которых наука не могла доселе достаточно уяснить, северо-западные ледники или глетчеры постепенно подавались на юго-восток, бороздили и частью разрушали встречаемые ими на пути каменные породы и относили их, смотря по относительной величине оторванных частей, ближе или далее от первоначального места образования. Таким образом северо-восточная часть Германии и северо-западная Россия покрылись песками и глинами, остатками огненных пород Финляндии и Скандинавии, разрушенных движением вод и снегов. Это достаточно доказывается как большими глыбами и гальками огненных, кристаллических пород, отложенных в пески северной России и употребляемых на постройки и мостовые, так и тожеством в физических признаках этих каменных пород с породами Финляндии и Скандинавии; нахождением под Москвою замечательных Иматрийских камней, которые в Европе, в первоначальном месте отложения, известны только в Финляндии, у Иматрийского водопада (Иматра); наконец, тем, что как скандинавские и финляндские горные породы, так и толщи Псковской и Новгородской губер-

ний испещрены бороздами, могущими образоваться только от движения ледников и вод, направленных преимущественно от северо-запада на юго-восток. Это движение ледников, переносивших пески, закругленные гальки и большие глыбы огненных пород, направившихся на юго-восток, вероятно, потому, что северо-западная Россия в то время опустилась вследствие выдвигания масс на восточной части Урала, доходило до центральной геологической оси, которой незначительных высот, вероятно, достаточно было, чтобы остановить и без того ослабленное движение северо-западного потока. По крайней мере, по ту сторону центральной оси в южной полосе России нет ни малейших следов упоминаемого северо-западного движения кристаллических пород» (стр. 90—91).

Несомненно, эти выводы отражают более глубокое понимание Рулье причин образования ледниковых явлений в сравнении с суждениями по этому предмету академика Бэра. Если Бэру было «непонятно», каким образом покров материкового льда мог столь далеко спуститься в равнину и протащить обломки финляндских скал за Москву, поскольку в Сибири, как показали путешествия Миддендорфа, говорил он, «ничего подобного не происходило», то все эти вопросы, как показывает приведенная цитата, весьма четко и ясно представлял себе Рулье. При этом необходимо отметить, что взгляды Бэра были известны ограниченному кругу ученых, тогда как взгляды Рулье были широко известны не только среди ученых сфер его времени, но и среди широкой публики и, таким образом, имели огромное значение в подготовке благоприятной почвы для восприятия учения о ледниковом периоде П. А. Кропоткина. Больше того, мы склонны полагать, что влияние Рулье как выдающегося эволюциониста сказалось и на разработке актуалистической основы этого учения, тем более что его воззрения на природу были хорошо известны Кропоткину и его ближайшим предшественникам.

Большая роль в создании актуалистической основы теории четвертичного оледенения принадлежит талантливому ученику и последователю К. Ф. Рулье — Н. А. Северцову (1827—1885). Северцов за 11 лет, с 1857 по 1868 г., при активном содействии Русского географического общества предпринял ряд путешествий по Туркестанскому краю. Но особенно богатыми научными результатами, давшими Северцову право разделять с П. П. Семеновым честь открытия науке страны «Небесных гор», были его путешествия в Тянь-шань в 1864—1868 гг. За этот период экспедиционной деятельности Северцов сделал ряд важных открытий в области геологии, географии, ботаники, зоологии и т. д.

Тщательные исследования в упомянутых и других местах Тянь-шаня следов древнего оледенения привели Северцова к следующим выводам.

1. Валы или гряды валунов, разбросанные по долинам и склонам хребтов преимущественно западного Тянь-шаня, являются типичными боковыми и конечными моренами древних ледников.

2. В Тянь-шане древние ледники имели большее распространение и спускались до высоты не ниже 2500 футов. «Ниже 2500 ф., если судить по северным склонам Киргизского хребта, тяньшанских валунов нет. В степи они не встречаются, следовательно, пловучими льдами не разносились, и море, некогда покрывавшее степь, не поднималось до этой высоты или ледники не спускались до уровня тогдашнего моря» (1867а, стр. 144).

3. Эти «грядины», или скопления камней, не могли произойти непосредственно от обвалов, так как «валуны принадлежат к гранитным, сиенитовым и диоритовым породам, образующим скалы на 10—15 верст далее вглубь горной цепи».

4. «Двигателем» эрратических валунов были древние ледники, поступательное движение которых «сдерживалось образованием нижнего края» (1867а, стр. 145).

5. Образование древних ледников в Тянь-шане было связано «с бывшим соединением Каспийского и Аральского морей между собой, с озером Балхаш и с Ледовитым океаном». Здесь был «приморский климат», очевидно «влажнее нынешнего, и этой влажности, даже при меньших зимних морозах, чем теперь, было уже достаточно, чтобы произвести в горах массы снега, каких теперь уже нет» (1867а, стр. 146).

6. Следы древнего оледенения Тянь-шаня показывают, что «они зависели от тогдашнего распределения материков и морей» (1865б, стр. 129).

Более основательно Северцов развил свои взгляды по интересующему нас вопросу в своей речи «О следах древних ледников в Средней Азии» (1870), произнесенной 29 августа 1869 г. на общем заседании 2-го съезда русских естествоиспытателей в Москве. Сначала Северцов изложил состояние проблемы о ледниковом периоде, а потом обратился к своим среднеазиатским наблюдениям. Говоря об «эрратических формациях» Средней Азии и их отношении к ледниковому периоду, Северцов заметил, что по Оренбургской степи, близ Мугоджар, рассеяна мелкая галька тех же горных пород, из которых состоят эти горы. Аналогичную картину он наблюдал у подошвы Кара-тау, где рассеяна такая же мелкая галька и также без крупных валунов.

Что же касается крупных валунов, то, согласно его наблюдениям, они встречаются в горах Тянь-шаня, образуя там «вместе с глиной и песком огромные толщи эрратического наноса, лежащего не ниже 2000—2500 ф. высоты». У подошвы гор эта эрратическая формация образует широкую, в 15—20 км и более, сплошную волнистую полосу, заметно выделяющуюся на общем фоне окружающей ее местности. Происхождение этой «эрратической полосы» Северцов объяснял деятельностью прежних тяньшанских ледников, рассматривая ее как пояс древних конечных морен, «еще сохранивших свою форму, именно форму валсобразных насыпей, состоящих из валунов, гальки, глины и песку, неправильно перемешанных между собою» (1870, стр. 119).

Северцов подчеркнул далее, что поскольку «порода валунов (преимущественно гранит) большей частью одинакова не с ближайшими обнажениями, а с более отдаленными, находящимися в вершинах долин», то «осыпями это образование объяснимо быть не может» (1870, стр. 119). Точно так же невозможно объяснить эти образования «обвалами» и «перенесением водой», тем более, что гранитные валуны встречаются не только на дне и склонах долины, но и на вершинах пересекающих ее скалистых гряд.

Кроме того, его наблюдения показали, что хотя и тяньшанские ледники «спускались прежде на 7000 ф. ниже теперешнего, но до уровня моря не доходили, а приносимые ими вниз валуны пловучими льдинами не разносились». Напротив, все свидетельствует о существовании «ледяного периода», когда многие горы Тянь-шаня были увенчаны мощными покровами льда. И именно этот лед, медленно сползая с Небесных гор «принес эти валуны, а при таянии оставил их на настоящих местах» (1870, стр. 119). Об этом же говорят и отполированные и исчерченные скалы, встреченные здесь также впервые Северцовым, хотя этот достоверный признак бывшего оледенения в Тянь-шане имеет, по Северцову, весьма ограниченное распространение. Отполированные и изборозжденные поверхности скал встречаются далеко не везде, где имеются «прочие ледни-

ковые следы». Этот факт Северцов объясняет «сильным выветриванием и разрушением обнаженных поверхностей среднеазиатских утесов при резких переменах температуры и влажности воздуха» (1870, стр. 120).

Причину широкого распространения древних ледников в Тянь-шане Северцов видел в более влажном в сравнении с современным «приморском климате», обусловленном существованием огромного моря-залива Северного Ледовитого океана на месте теперешних Киргизских и Туранских степей.

Что же касается объяснения всех явлений ледяного периода вообще, то здесь, по словам Северцова, «нужно обратить внимание на тогдашнее общее распределение материков и морей, указываемое не одной Сахарой, а в с е м и степями и вообще плиоценовыми и послетретичными почвами морского образования, и сообразить влияние полного и даже неполного прекращения теплых течений к полярным морям при их тогдашней обширности». В подтверждение своего мнения Северцов указывает на тот факт, что наблюдения дают основания считать морским дном не только Киргизскую степь, но и другие, сходные с ней по своим почвам, образованию и топографическим условиям, а именно: Сахару, внутренние степи южной Африки, пампасы Лаплаты и Патагонии, прерии и Большой бассейн Северной Америки и т. д. Не признавая «совершенной одновременности» существования этих бывших морей, Северцов на основании имевшихся в его время данных считал себя вправе утверждать, что «в плиоценовый период материка в средних и высоких широтах были более раздроблены, нежели теперь, следовательно, не могло быть континентальных морозов» (1870, стр. 122).

Что касается «уменьшения горных ледников до их настоящего объема», то, как полагает Северцов, «всего вероятнее объясняется не изменением в нагревании Земли Солнцем, а нарастанием материков и образованием вследствие этого сухих континентальных климатов» (1870, стр. 122).

Второй доклад на эту же тему Северцов сделал на Международном географическом конгрессе в Париже летом 1875 г. до выступления О. Торелля осенью 1875 г. в Немецком геологическом обществе в Берлине (о наблюдениях над явлениями современного и древнего оледенений в северной Европе). За доклад Северцов получил высшую награду конгресса — «Золотую медаль» (Золотницкая, 1947).

Н. А. Северцов, как и К. Ф. Рулье, оказал значительное влияние на П. А. Кропоткина. «Северцов,— писал Кропоткин,— был выдающийся зоолог, талантливый географ и один из самых умных людей, которых я когда-либо встречал» (1933). Его мысли о физико-географических изменениях, происходивших в течение ледникового периода, Кропоткин считал «весьма дельными обобщениями» (1871б, стр. 300).

Почти одновременно с изучением Н. А. Северцовым следов ледникового периода в Тянь-шане, в 1863 г. Г. Н. Потанин (1835—1920) совместно с К. В. Струве в горах Сары-тау в южном Алтае, ныне лишённых ледников, обнаружили валообразные скопления валунов гранита и признали их за морены древних ледников (Струве и Потанин, 1867а). В 1864 г. эти же исследователи обнаружили аналогичные следы древних ледниковых явлений в хребте Тарбагатае (Струве и Потанин, 1867б), что было подтверждено наблюдениями Е. Михаэлиса, произведенными в 1871 и 1872 гг.

К ценным выводам в итоге изучения ледниковых явлений Прибалтики пришел академик Ф. Б. Шмидт (1832—1908), которого П. А. Кропоткин считал своим учителем геологии и предшественником по разработке лед-

никовой теории. Возвратившись в 1863 г. из Сибири, Шмидт познакомился с новейшими исследованиями ледникового периода в Швеции и Норвегии, а летом 1864 г. принялся за изучение наносов в Эстонии. Уже тогда он убедился в том, что следы бывшего оледенения Скандинавии имеются на силурийской почве Эстонии и о. Эзеля и опубликовал по этому вопросу статью в «Бюллетене Академии Наук». В 1865 г. Шмидт ездил в Швецию и Швейцарские Альпы, чтобы на месте ознакомиться с ледниковыми явлениями. В 1866 г. его исследования были прерваны вторичной поездкой в Сибирь для поисков трупа мамонта, а в 1867 г. он снова вернулся к прежним геологическим исследованиям Эстонии, стремясь как можно подробнее изучить ледниковые образования и распределение отложений различных по времени и характеру происхождения.

Сделав сравнительный анализ послетретичных образований Швеции и Эстонии, Шмидт (1871) пришел к убеждению, что к концу третичного периода вся Швеция, подобно современной Гренландии, была покрыта огромным и мощным ледяным покровом. Балтийского моря тогда не было, а потому Скандинавский ледник через эту местность и Финляндию безостановочно двигался в Эстонию и Петербургскую губернию. Конечный, или передний край этого ледника трудно определить, так как за пределами твердых пород силурийской формации Эстонии и Петербургской губернии нельзя заметить шрамов и типичного кросстенгруса (ледниковой щелбенки), прекрасно развитого в равнинах Эстонии. Следовательно, заключил Шмидт, «надо полагать, что конец этого ледника спускался в море или большое озеро, по которым ледяные горы разносили северные валуны далеко на юг». Вместе с тем он подчеркивал, что «нельзя не видеть в огромных и неправильных скоплениях валунов в Валдайских горах и на девонской почве Лифляндии и Литовской губернии, что они представляют нечто вроде конечной морены, подвергавшейся впоследствии действию вод» (стр. LXXIII).

Шмидт полагал, что поверхность Эстонии после исчезновения большого ледника весьма походила на нынешнюю Финляндию: была покрыта большими озерами, между которыми возвышались складки основной морены «низкими перешейками». На этих «перешейках» действием прибоя и озерных льдов отлагались те правильные валы из антиклинально наслоенного гравия и песка, которые напоминают шведские озы и известны в Финляндии под именем Свиных хребтов. Как видно, Шмидт деятельности древних скандинавских ледников придавал большое значение, но не отказывался и от признания роли плавающих льдин.

В те же 70-е годы академик Г. В. Абах (1806—1886) открыл древние ледниковые явления на Кавказе (1871а). Небезынтересно отметить, что в первый период своей многолетней экспедиционной деятельности (50-е годы) Абах сомневался в возможности найти на Кавказе следы ледникового периода, но более поздние геологические исследования, произведенные им в долине р. Терека, развеяли это сомнение.

В 1861 г. Абах приступил к изучению Девдоракского ледника Казбека, в 1867 г. он вновь отправился на Казбек для дальнейшего изучения ледника. Закончив гляциологические исследования ледника, Абах отправился вниз по долине Терека, где и обнаружил следы существования древних ледников. Он нашел три боковых морены, расположенных в виде террас у устья Девдоракского ущелья, шлифованные и изборозжденные поверхности гранитных скал близ Девдоракского ущелья и скопление эрратических камней (несколько выше р. Ларса), имеющих точно такой же

петрографический состав, что и породы, слагающие Казбек в его верхней части.

Следы пребывания древних ледников Абих наблюдал также в долинах рр. Тарсу и Камбеевки, составляющих правые притоки Терека. Основываясь на личных наблюдениях и учитывая топографические условия данной местности, Абих сделал вывод, что в ледниковый период в долине Терека существовал огромный ледник, передний край которого находился в 2 км от Владикавказа (1871б).

Абих не только обнаружил на Кавказе скопления эрратических валунов, их нагромождения в виде гряд (морен), отполированные и изборожденные поверхности скал, но объяснил происхождение этих явлений существованием и деятельностью прежних ледников.

Из сказанного выше со всей очевидностью следует, что прямыми, непосредственными предшественниками создателя учения о ледниковом периоде, П. А. Кропоткина, являются не зарубежные ученые — Кювье, Агассиц, Беклэнд, Шимпер, а русские естествоиспытатели: Бэр, Рулье, Северцов, Потанин, Струве, Шмидт и др.

Литература

- Абих Г. В. (1871а). Нынешние и древние ледники Кавказского хребта. Изв. РГО, т. 7, № 2, СПб.—Абих Г. В. (1871б). Результаты исследования распространения древних ледников на северном склоне Кавказа. Извлечение из протокола заседания Кавказского отдела Русского географического общества от 23 декабря 1870 г. Изв. РГО, т. 7, № 4, СПб.—Агассиц Л. (1867). Геологические очерки. Перевод с английского В. Ковалевского. СПб.—Бэр К. М. (1950). Автобиография. Перевод Б. Е. Райкова. Изд. АН СССР, М.—Л.—Воейков А. И. (1881). Климатические условия ледниковых явлений настоящих и прошедших. Зап. СПб. минералог. общ., 2-я сер., ч. 16, СПб.—Даньшин Б. М. (1944). Важная дата в изучении четвертичной эры в СССР. Природа, № 1—Золотницкая Р. Л. (1947). Николай Алексеевич Северцов. В кн.: Н. А. Северцов. Путешествие по Туркестанскому краю. М.—Карлов Н. Н. (1953). С. Н. Никитин и значение его работ для развития отечественных геологических наук. Очерки по истории геологических знаний, вып. 1, Изд. АН СССР.—Кропоткин П. А. (1868). Олекминско-Витимская экспедиция. Краткий отчет. Изв. РГО, т. 4, СПб.—Кропоткин Н. А. (1871а). Доклад о предстоящей поездке для исследования ледникового периода в Финляндии. Изв. РГО, т. 7, № 4, СПб.—Кропоткин П. А. (1871б). Письма Географическому обществу из Финляндии. Изв. РГО, т. 7, № 6, СПб.—Кропоткин П. А. (1873). Отчет об Олекминско-Витимской экспедиции, снаряженной в 1866 г. Изв. РГО, т. 3, СПб.—Кропоткин П. А. (1876). Исследования о ледниковом периоде. Зап. РГО, т. 7, СПб.—Кропоткин П. А. Исследования о ледниковом периоде. Второй (неопубликованный) том. Валун (гл. XVII). Классификация постплиоценовых наносов (гл. XVIII). Морены и озера (гл. XIX). М., Центр. гос. истор. архив.—Кропоткин П. А. (1933). Записки бунтовщика. Изд. «Academia». —Кропоткины П. А. и А. А. (1932). Переписка Петра и Александра Кропоткиных. Изд. «Academia», М.—Л.—Марков К. К. (1955). Антигляциализм. Изв. АН СССР, сер. геогр., № 1, М.—Мензбир М. А. (1923). Великий ледниковый период Европы. Пгр.—Обручев В. А. (1934). История геологического исследования Сибири, т. 3. Изд. АН СССР, М.—Л.—Обручев В. А. (1951). Юные движения на древнем темени Азии. В сб.: В. А. Обручев. Избранные работы по географии Азии, т. 2, М.—Пидопличко И. Г. (1946). О ледниковом периоде. Киев.—Пидопличко И. Г. (1947). К вопросу о ледниковом периоде. Тезисы доклада на II Всесоюзном географическом съезде. М.—Л.—Пидопличко И. Г. и П. С. Макеев. (1952, 1955). О климатах и ландшафтах прошлого, вып. 1 и 2. Изд. АН УССР.—Рулье К. Ф. (1852). Жизнь животных по отношению ко внешним условиям. Публичные лекции, читанные в Московском университете в 1851 г. М.—Северцов Н. А. (1865а). Следы ледяного периода в западных отрогах Тянь-шаня (из письма Н. А. Северцова президенту Лондонского географического общества Родерику Мурчисону). Изв. РГО, т. 1, № 5, СПб.—Северцов Н. А. (1865б). О научных исследованиях в Забайкальском крае летом 1864 года. Изв. РГО, т. 1, № 7, СПб.—Северцов Н. А. (1867а). Поездка в западную часть Небесного

хребта. Зап. РГО, т. 1, СПб.—Северцов Н. А. (1867б). Дополнение к статье «Поездка в западную часть Небесного хребта». Копия с рапорта в Главный штаб от 8 июня 1866 г. № 27. Зап. РГО, т. 1, СПб.—Северцов Н. А. (1869). О следах ледяного периода в Тянь-шане (протокол общего собрания Географического общества от 5 февраля 1869 г.). Изв. РГО, т. 5, СПб.—Северцов Н. А. (1870). О следах древних ледников в Средней Азии. Речь, произнесенная 29 августа 1869 г. на 2-м съезде русских естествоиспытателей в Москве. Тр. 2-го съезда русских естествоиспытателей, М.—Северцов Н. А. (1947). Путешествия по Туркестанскому краю. М.—Струве К. и Г. Потанин. (1867а). Путешествие на озеро Зайсан и в речную область Черного Иртыша до озера Марка-Куль и гор Сары-тау летом 1869 г. Изв. РГО, т. 1, СПб.—Струве К. и Г. Потанин. (1867б). Поездка по восточному Тарбагатаю летом 1864 г. Зап. РГО, т. 1, СПб.—Танфильев Г. И. (1916). География России, ч. I. Введение. Одесса.—Шмидт Ф. Ю. (1871). Сообщение об исследованиях осадков Эстляндии и сравнение их с подобными же осадками Швеции. Тр. СПб. общ. естествоиспыт., т. 2, СПб.—Щуровский Г. Е. (1870). Речь на втором съезде русских естествоиспытателей в Москве в 1869 г. Тр. 2-го съезда русских естествоиспытателей, М.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й . С Б О Р Н И К . X

ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО СОЮЗА ССР

Н. Н. СОКОЛОВ

О ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕРМИНОЛОГИИ

Терминология, применяемая в геоморфологии у нас и за рубежом, далеко не совершенна. Это объясняется прежде всего историческими причинами. Современная геоморфология, как известно, резко отличается по самой своей сущности от орографии, которую она сменила. Между тем термины в геоморфологии в значительной их части сохранились от прежних времен, т. е. от орографии. Поэтому нередко наблюдается резкое несоответствие между новым, эволюционно-генетическим содержанием современными геоморфологическими работ и применяемыми в последних старыми терминами описательного характера, которым пытаются придать новый смысл. Развитие терминологии, создание новых, рациональных терминов отстает от хода общих генетических эволюционных и географических представлений в геоморфологии. Это вызвано в значительной мере тем, что до сих пор не разработаны ни таксономические генетические, ни местные, «провинциальные» системы геоморфологических терминов, которые вполне отражали бы генетические и возрастные особенности, а также провинциальные, местные различия форм рельефа, что стоит в связи с недостаточным изучением провинциальных форм рельефа. Недостаток новых терминов генетического характера объясняется и тем, что систематикой их форм рельефа занимаются недостаточно и к попыткам подобного рода не относятся с должным вниманием. Поэтому в геоморфологии до сих пор преобладают старые термины, обозначающие лишь внешние черты поверхности. Эти термины подходят, и то не всегда, лишь к некоторым основным генетическим подразделениям рельефа (горы, речные долины и пр.).

Само собой разумеется, что установление вполне обоснованных геоморфологических терминов возможно лишь в результате основательного, «монографического» исследования элементов рельефа различных типов и в разных геоморфологических областях; при этом должны учитываться все их особенности, начиная с внешнего вида и кончая строением, генезисом и развитием. Некоторая работа в указанном направлении ведется у нас и за рубежом; при этом геоморфологи, изучающие формы различных типов, пытаются создать новые, рациональные генетические термины (например, для форм ледниковых и эрозионных, эоловых и береговых). Введение новых терминов, естественно, должно идти также и за счет местных, народных терминов, метко отражающих внешние черты форм.

При пересмотре старых терминов важно выяснить их происхождение и развитие. Вместе с тем необходимо внимательнее относиться к терминам, предложенным другими исследователями: к сожалению, нередко

создают новые термины, не обращая внимания на достаточно удачные существующие.¹

Большую помощь оказывает терминология, принятая в других странах. Необходимо лишь использовать ее как можно лучше, не искажая первоначального, основного смысла термина и передавая его на правильном русском языке. Между тем нередко ограничиваются внедрением в нашу науку самого иностранного термина (иногда в неправильной транскрипции, т. е. в искаженном виде), либо дают неудачный перевод (например, «дурные земли», «дикие воды» и т. п.).

Большую помощь в усовершенствовании терминологии должно оказать систематическое сопоставление терминов на различных языках. В этом отношении особенно важны специальные обзоры терминов. Мы имеем в виду недавно опубликованный обзор Махачека (Machatschek, 1951), где приведены геоморфологические термины на 4 языках: английском, испанском, немецком и французском. Однако пользование этим обзором затруднено из-за того, что объяснительный текст к терминам составлен на испанском языке.

В последнее время сводку геоморфологических терминов на английском, французском и немецком языках опубликовал известный французский геоморфолог Болиг (Baulig, 1956).²

Ниже приведем несколько примеров устарелых геоморфологических терминов, которые не соответствуют современным представлениям о рельефе.

1. До сих пор у нас широко распространен термин «орография», который за рубежом уже почти не употребляется. Этим термином обозначаются либо внешние черты поверхности, либо ее крупные, основные особенности. В первом случае нередко отдельно характеризуют «орографию» местности, а затем ее «геоморфологию» и, таким образом, отрывают формы от их свойств. Это наблюдается нередко в геологических работах, где глава «Орография» помещается сначала, а «Геоморфология» в конце. Неправильным является употребление термина «орография» и при рассмотрении крупных черт поверхности, для которых существует более определенное понятие — «макрорельеф».

На основании сказанного мы считаем, что термин «орография» не находит места в современной геоморфологии и его необходимо изъять из употребления, заменив терминами — «макрорельеф», «общий характер рельефа», «основные черты рельефа», «основные элементы рельефа» и др.

2. И термин «современный рельеф» употребляется обычно в неправильном смысле. Дело в том, что всюду мы имеем по преимуществу формы не современные, а возникшие под воздействием былых процессов, в особенности ледникового времени, а нередко и более древних, доледниковых (особенно в горных областях и на возвышенностях, среди равнин). Современные же формы играют обычно подчиненную роль в рельефе.

¹ Я. С. Эдельштейн в своих «Основах геоморфологии» отмечал несовершенство существующей геоморфологической номенклатуры; он рекомендовал при этом «в основу... терминологии... класть выражения нейтральные, оттеняющие прежде всего внешние особенности форм; термины же, указывающие на их генезис, предпочтительно употреблять в виде прилагательных... (например, абразионная равнина)». Вместе с тем предлагается «быть осторожным в применении терминов, основанных на априорных дедуктивных соображениях», ибо, «когда материала мало, они могут сбивать исследователя с правильного пути» (Эдельштейн, 1947).

² У нас обширный обзор геоморфологических терминов составлен И. С. Щукиным. Необходимость в его скорейшем опубликовании совершенно очевидна.

11 Географический сборник, вып. X.

Сюда относятся пойменные террасы рек, побережья морей и озер, эоловые формы на оголенных участках, сложенных песками, а также карстовые формы и формы в полосе вечной мерзлоты¹.

Поэтому правильнее в большинстве случаев говорить не о современном рельефе, а о видном (наблюдаемом) рельефе, в составе которого имеются формы различного возраста².

3. Помимо указанных примеров неразработанность терминологии и недочеты принципиального научного значения наблюдаются и по отношению к формам различных типов. Это сильно ощущается при характеристике эрозионных форм, равнинных и горных, для которых при всем их разнообразии мы располагаем лишь небольшим количеством терминов, нередко плохо отражающих своеобразие данных форм (например, балка, ложбина, лог, потяжина, овраг, промоина и др.). То же следует сказать и про формы ледниковые и водно-ледниковые. И в этом случае применяется ограниченный набор общих, «казенных» терминов, которые нередко не отвечают местным условиям происхождения и развития форм, а также их типичным особенностям.

Так, под именем холмисто-моренного ландшафта (рельефа) понимают и холмисто-озерный рельеф в полосе последнего оледенения, и холмисто-долинный (ложбинный) рельеф в полосе предпоследнего оледенения. Озерно-ледниковые абразионные равнины нередко называют моренными только потому, что эти образования сложены сверху валунным суглинком. Древние ложбины обычно считают флювиогляциальными, хотя, как правило, они возникли при стоке вод ледниковых водоемов. Помимо холмисто-озерного (моренного) и камового рельефа, необходимо учитывать широко распространенные смешанные, камово-моренные формы.

4. Ниже приведем несколько примеров для таких элементов рельефа, как водоразделы, речные долины, горы.

Вряд ли правильно применять один термин — «водораздел» для обозначения междуречий в различных геоморфологических провинциях, междуречий, переживших совершенно особое развитие. Водоразделы степной полосы, с долинным рельефом, как известно, отличаются резкими, чаще «горбатыми», выпуклыми очертаниями, которые возникли под длительным воздействием различных денудационных процессов (эрозии главных и боковых рек, плоскостного смыва и пр.). Это — формы, сильно измененные после того, как они были заложены при формировании «главных» рек, их ограничивающих.

Совсем иное дело — водоразделы в ледниковых областях, особенно в полосе последнего оледенения. Они представляют собой здесь ледниковые и озерно-ледниковые формы, чаще озерно-ледниковые равнины, а также моренные и зандровые равнины (местами — холмистый рельеф). Формы эти почти не изменены под воздействием последующих денудационных процессов — эрозии и плоскостного смыва: это — «зачаточные» водоразделы, водоразделы *in statu nascendi*.

Таким образом, признавая необходимым различать водоразделы разных стадий развития, надо обозначать их особыми терминами. Термин «водораздел» следовало бы, по нашему мнению, сохранить лишь для хорошо развитых эрозионных образований. В тех же случаях, где на пер-

¹ Современные формы необходимо выделять особо на геоморфологических картах.

² Соображения по этому поводу высказывались рядом авторов, например, Л. С. Бергом (1947) и Н. Н. Соколовым (1948).

вый план выступают первичные, мало измененные формы, лучше употреблять нейтральный термин — «междуречье».

Нельзя также одним термином обозначать для равнин речные долины ледниковой и внеледниковой полос. В первом случае преобладают зачаточные долины, без коренных берегов, где реки врезаны в бывшие днища ледниковых водоемов и имеют обычно лишь пойменную, либо и низкую надпойменную террасу. В этих случаях, следовательно, отсутствуют коренные берега, созданные речной эрозией¹. Поэтому долины крупных рек представляют собой чередование озеровидных расширений на месте ледниковых водоемов и коротких «каньонообразных» участков там, где реки прорезывают краевые ледниковые гряды на дне древних ложбин. Такую картину наблюдаем на верхней Волге и Западной Двине, в верхнем течении Днепра, на Мсте. Для этих долин нельзя никоим образом строить профили, где бы выделялись системы нескольких непрерывных речных террас, как это делает для Западной Двины и Мсты Ю. А. Мещеряков. Отсюда следует, что и выводы Ю. А. Мещерякова о новейших движениях земной коры, сделанные на основании указанных, произвольно построенных профилей не имеют под собой почвы (Мещеряков и Синягина, 1956).

Недостаточно удовлетворительны и термины, относящиеся к горным формам: условны и мало обоснованы термины для гор различной высоты и при разграничивании гор и холмов. В самом деле, суть заключается не столько в высотных различиях, как принято издавна, а в характере, особенностях склонов гор и холмов в зависимости от состава пород и от характера денудационных процессов (т. е. от ландшафтных условий). Так, горами следует считать резкие положительные формы даже при малых высотах: это можно наблюдать в случае вершин с плотными породами и с резкими очертаниями склонов. Холмы же, как правило, представляют собой вершины малой высоты, с мягкими склонами в рыхлых породах. И прав был покойный Б. Ф. Добрынин, принявший за горы останцовый рельеф Керченского полуострова, где отдельные вершины с резкими склонами в известняках (Добрынин, 1929) имеют часто высоту менее 100 м. Особенности рельефа гор, как известно, определяются помимо пород, слагающих горы, географическими, ландшафтными условиями, с которыми связан характер денудационных процессов, а через них и с особенностями в очертаниях склонов. Так, горы в условиях влажного морского климата отличаются мягкими очертаниями, а в условиях полярного климата резкими склонами.

5. В качестве примера неразработанности терминов для форм эрозийного происхождения отметим большую неопределенность, которая наблюдается при выделении «высокой поймы» и I надпойменной террасы.

Нередко различные авторы одну и ту же террасу, расположенную над нижней, пойменной террасой, называют то высокой поймой, то I надпойменной террасой; при этом не приводится основательных доводов в пользу того или иного определения. Как известно, в рельефе и составе отложений поймы и I надпойменной террасы нередко наблюдается много общего. К тому же и I надпойменная терраса часто подвергается затоплению, т. е. испытывает воздействие пойменных процессов. (Указанными причинами и объясняется отсутствие вполне обоснованного разделения I надпойменной террасы и высокой поймы).

¹ Таким образом, можно говорить о реках без долин, как это предлагают сделать В. В. Ермолов и С. Л. Троицкий на основании работ в Арктике. (Устное сообщение).

Однако имеется возможность достаточно точного решения задачи. Необходимо учесть, что во многих случаях I надпойменная терраса стала затопляться в половодье лишь за последние 75—50 лет: в связи с усиленной рубкой лесов уровень полых вод теперь нередко значительно выше, чем прежде. Поэтому многие города и села, расположенные на I надпойменной террасе и ранее, как известно, не подвергавшиеся затоплению, в настоящее время очень страдают в половодье. Таким образом, один факт затопления террасы полыми водами не дает права причислять ее к исконным пойменным образованиям.

Основное различие заключается в «стратиграфических» особенностях поймы и I надпойменной террасы. Первая сложена исключительно аллювиальными отложениями, т. е. речными наносами; вторая же, как правило, несет на поверхности более или менее хорошо сформированные почвы. При частом затоплении надпойменной террасы почвы прикрыты современным аллювием, обычно небольшой мощности (погребенные почвы). Высокая же пойма, которая не затопливается в исключительных случаях, сложена лишь аллювием.

Высокая пойма и I надпойменная терраса различаются также по возрасту и развитию. Высокая пойма формируется на наших глазах по берегам рек, обычно несущих много наносов и при значительных колебаниях уровня реки. Высокая и низкая пойма формируются, следовательно, одновременно, но при различных сезонных уровнях реки. I надпойменная же терраса была создана в далеком прошлом при иных, более высоких уровнях; затем она была «законсервирована» настолько, что геологические процессы на ней уступили место почвенным. Таким образом на I надпойменной террасе, в отличие от поймы, формирование рельефа закончено и происходит развитие почв, «консервирующих» рельеф указанной террасы. Она образовалась в большинстве случаев не позднее позднеледникового времени. И лишь под воздействием человека, при повышении уровня разливов, I надпойменная терраса снова затопливается и заносится аллювием¹. К I надпойменной террасе приурочены, как правило, стоянки доисторического человека.

Таким образом, и строение и развитие затопляемой I надпойменной террасы совсем иные, чем у высокой поймы, отличающейся постоянным пойменным режимом.

Из приведенного примера ясно, что точное наименование форм рельефа требует обычно основательных сведений об их строении, происхождении и развитии.

Литература

- Берг Л. С. (1947). Географические зоны, т. I. Географиз, стр. 18. — Добрынин Б. Ф. (1929). Геоморфология и ландшафты Керченского полуострова. Журн. «Крым», т. I (9). — Мещеряков Ю. А. и М. И. Синягина. (1956). Современные движения земной коры и методы их изучения. Вопр. географии. Сб. статей для XVIII геогр. конгресса, Изд. АН СССР. — Соколов Н. Н. (1948). О геоморфологических провинциях Русской равнины. Тр. Почв. инст. АН СССР, т. 27. — Эдельштейн Я. С. (1947). Основы геоморфологии. М., стр. 22. — Baulig H. (1956). Terminologie anglo-franco-allemande de Géomorphologie. Paris, Les Belles Lettres. — Machatschek F. (1951). Terminologia geomorphologica. Univ. Nacional de Tucuman, Inst. de Estudios geográficos.

¹ Здесь мы не рассматриваем более редкого и более медленного явления — заноса аллювием надпойменной террасы в результате опускания земной коры.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . X

ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО СОЮЗА ССР

А. П. СИГОВ

РАНЕЧЕТВЕРТИЧНАЯ ПЕРЕУГЛУБЛЕННАЯ
ТОБОЛО-УБАГАНСКАЯ ДОЛИНА

В осевой части Тургайской низменности геоморфологически отчетливо выделяется широкая (10—20 км) и глубоко врезанная меридиональная долина. Между 52 и 54° с. ш. вдоль этой долины, с юга на север, протекает небольшая река Убаган, совершенно не соответствующая своими малыми размерами столь обширной и, очевидно, более древней долине. В пределах последней здесь также находится крупное озеро Кушмурун и ряд более мелких озер.

Несколько севернее 54° с. ш. в эту древнюю долину вступает с запада р. Тобол, которая принимает справа р. Убаган. Характер долины р. Тобол при этом резко меняется. Долина становится заметно шире, а р. Тобол начинает описывать большие меандры. Такой характер долины Тобола, при почти прямолинейном ее общем направлении на северо-северо-восток, сохраняется до устья р. Тавды (несколько южнее г. Тобольска), где Тобол заворачивает на восток.

К югу от 52° с. ш. описываемая древняя долина, отчетливо выраженная в рельефе, прослеживается до оз. Челкар-тенгиз и вмещает целый ряд крупных озер (Аксуат, Сары-Копы и др.), а также р. Тургай (рис. 1). Ее положение на данном интервале наглядно представлено на Геологической карте СССР (лист М-41).

Наличие такого крупного, выдержанного геоморфологического элемента не могло пройти незамеченным при прежних исследованиях. В частности, И. М. Крашенинников писал: «... долина Тобола является непосредственным продолжением той огромной долинообразной низины, которая, начинаясь от места впадения в Тобол Абуги (р. Убаган, — А. С.)... тянется на протяжении около 700 км к югу, соединяя бассейн Тобола с бассейном Тургай» (1951а, стр. 426).

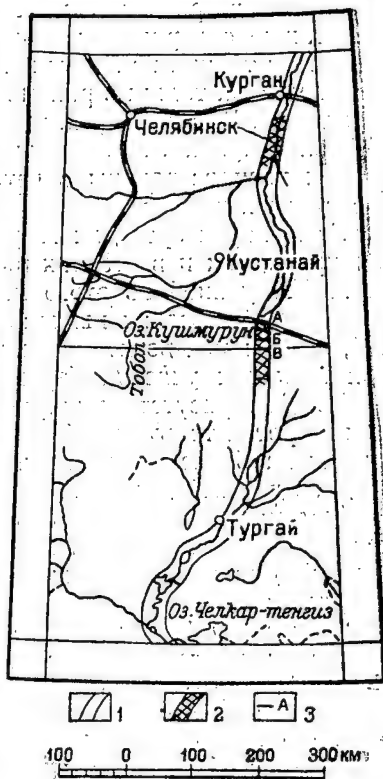


Рис. 1. Обзорная карта района.
1 — контуры переуглубленной раннечетвертичной долины; 2 — участки ее, прослеженные буровыми скважинами; 3 — линии профилей.

Х. 166 И И Ч О Д О И И А И П. Сигов. И О А Ч О И И. 1981

Материалы для расшифровки палеогеографического значения описываемой древней долины получены в результате буровых работ, проведенных главным образом Уральским геологическим управлением. На протяжении 80 км по меридиану от южного берега оз. Кушмурун до участка Дана-Бике буровыми скважинами во многих пунктах пересечена толща, выполняющая описываемую древнюю долину.

Как видно из прилагаемых профилей (рис. 2), мощность рыхлых отложений, выполняющих древнюю долину, составляет от 30 до 90 м и в среднем близка к 60 м. Отложения представлены зеленовато-бурыми, зеленовато-серыми, темно-серыми глинами и песчаными глинами, обычно сильно мергелистыми. Местами среди них встречаются редкие и мелкие щетки гипса, реже очень мелкие, черные (марганцевые?), округлые стяжения. В данной толще содержатся прослой песка, чаще наблюдаемые в ее основании. Спорадически встречается базальный полимиктовый галечник. В глинах и песках обнаружена мелкая тонкостенная фауна пелеципод и гастропод.

В 250 км севернее описываемого участка, по р. Тобол, буровыми скважинами нашей партии, проводившей геологическую съемку масштаба 1 : 500 000, встречена та же самая толща у поселков Губаново и Камышное, также содержащая мелкую, тонкостенную фауну, но при меньшей мощности толщи, не превышающей 30 м.

Из данной толщи в районе Кушмуруна А. И. Бер собрана фауна, среди которой И. В. Даниловским определены: *Sphaerium corneum* L.; *Pisidium nitidum* Jenyns., *P. amnicum* Müll.; *Valvata piscinalis* Müll. Все четыре формы распространены в четвертичных отложениях, из них только две последние известны также в плиоцене. По И. М. Даниловскому, *Pisidium amnicum* характерен для текучих водоемов, остальные могут обитать как в текучих, так и в стоячих водах. Из этой же толщи в образцах сборов В. А. Полухиной из этого же района ею определен спорово-пыльцевой комплекс. Древесная пыльца в заметных количествах представлена сосновой, елью, ивой, восковниковыми, каштаном (от 2 до 6% каждого вида), при меньшем участии березы, ольхи, дуба, клена, буковых и др. (по 1—1,5%). Присутствие широколиственных форм, произрастающих в данных широтах только на более увлажненном западном склоне Урала, указывает на более влажный, чем сейчас, климат района при образовании осадков древней долины.

Пыльца травянистых растений составляет около 40%. В ее числе на первом месте находятся лебедовые, несколько меньше лютиковых и в совершенно подчиненном количестве присутствуют сложноцветные, гвоздичные, злаковые.

По составу фауны данные отложения можно отнести к четвертичным, а по геоморфологическому положению — безусловно к плейстоценовым. Дальнейшее уточнение возраста мы, за недостатком других данных, вынуждены произвести косвенным путем.

В районе развиты более молодые, чем описываемая толща, верхнеплейстоценовые отложения I надпойменной аккумулятивной террасы. Они содержат богатый комплекс фауны, в котором из вышеперечисленных форм отсутствует только *Pisidium amnicum*. Однако, при значительной близости комплексов фауны, верхнеплейстоценовая толща резко отличается от описываемой своим спорово-пыльцевым комплексом. В последнем содержится 98% травянистой пыльцы и только 2% древесной, что

Сборы наши; определения И. В. Даниловского.

характеризует степную растительную зону. Широколиственные формы совершенно отсутствуют. Резкое различие растительных комплексов означает значительный временной разрыв между отложением толщи древней долины и толщи I надпойменной террасы, это позволяет толщу древней долины отнести к раннему плейстоцену.

Касаясь вопроса о направлении стока вод по древней долине, мы должны отметить следующее. Если в районе оз. Кушмурун абсолютные отметки поверхности в пределах древней долины достигают 110—120 м,

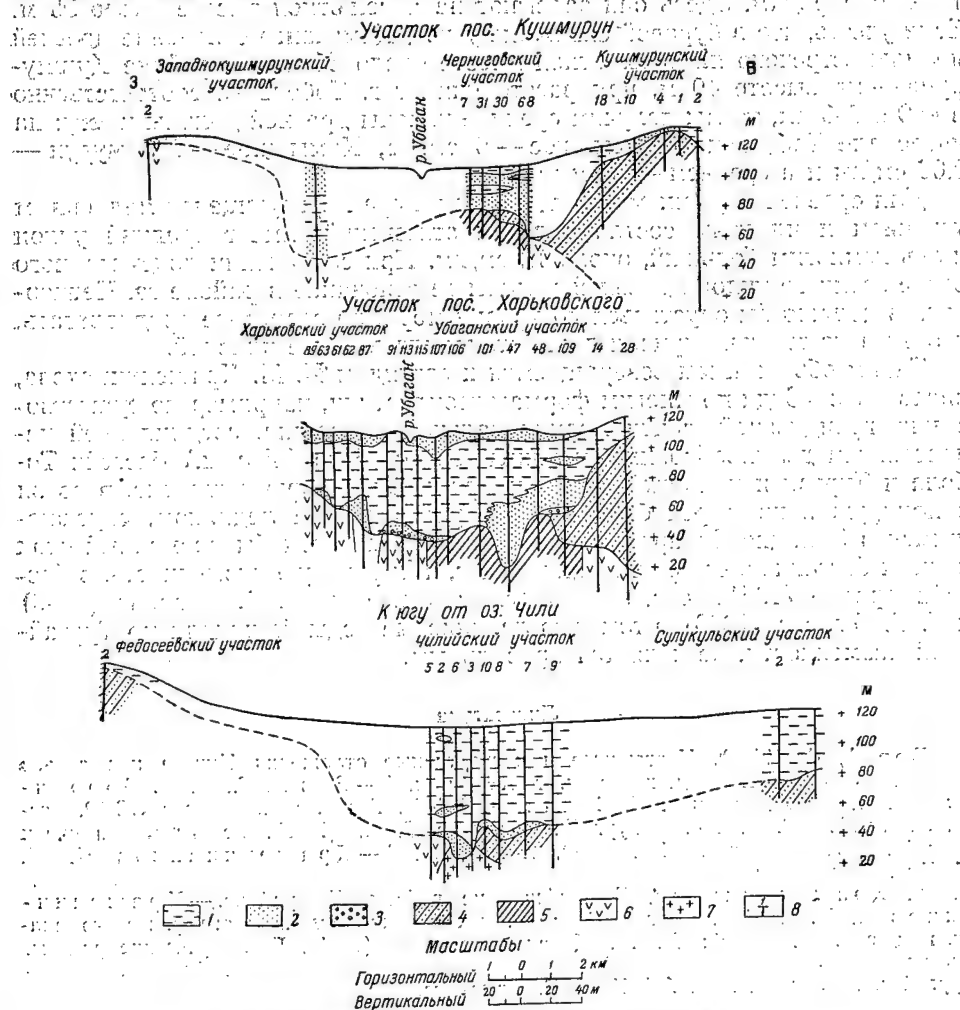


Рис. 2. Поперечные профили переуглубленной долины.

Четвертичная толща: 1 — глины и суглинки, 2 — пески, 3 — галечники. Породы плотика древней долины: 4 — третичные и меловые отложения, 5 — нижне-среднеюрская убаганская свита, 6 — пермо-триасовые базальты, 7 — пермо-триасовые липариты; 8 — буровые скважины и их номера.

то у оз. Челкар-тенгиза они снижаются до 50 м. Уже отсюда кажется мало вероятным предположение о северном направлении древнего стока. Напротив, в свете распространенных со времен Н. К. Высоцкого представлений о том, что по Тургайской низменности происходил сток вод из

обширного приледникового озера, существовавшего в Западной Сибири в эпоху оледенения, можно допустить, что именно этим стоком и обусловлена выработка широкой и глубокой долины, заполненной потом песчано-глинистыми отложениями. Гипсометрические сопоставления не противоречат такому заключению. Так, по данным А. Г. Бер (1938), озерно-ледниковые суглинки, супеси и флювиогляциальные пески с галькой, отлагавшиеся к югу от края сибирского ледникового покрова, достигают широты г. Тобольска, а к югу от него выклиниваются, прислоняясь к третичным породам. Здесь они залегают на абсолютной высоте около 95 м. Если учесть, что в буровой скважине у пос. Камышное основание древней долины встречено на абсолютной высоте около 55 м, а в районе Кушмуруна — на высоте 40 м, при расстоянии от г. Тобольска соответственно в 460 и 700 км, то мы получим средние уклоны древней долины к югу: на интервале Тобольск — Камышное — 9 см/км, Камышное — Кушмурун — 0.06 см/км и в среднем — 8 см/км.

Для сравнения укажем, что р. Убаган, характеризующаяся медленным течением и илистым составом своих отложений, имеет средний уклон лишь немногим больший, около 12 см/км. При сохранении подсчитанного выше среднего уклона древней долины ее основание в районе оз. Челкартенгиз должно бы опуститься до уровня моря, но вероятнее предполагать, что вниз по течению кривая ложа становилась более плавной.

Таким образом, мы возвращаемся к взглядам И. М. Крашенинникова, писавшего: «Судя по многим формам геопластики, например по существованию грандиозной, почти меридиональной депрессии, соединяющей непрерывным долинообразным понижением (с 46 по 54° с. ш.) бассейн Тобола и Тургая и имеющей выход к Аральскому морю, вероятно, в связи с подпруживанием рек бассейна Северного океана ледником, спускающимся в Западно-Сибирскую низменность, был хотя бы временный сток речных бассейнов, ее орошающих, на юг, а Туранскую низменность, в бассейн Арала» (1951б, стр. 561). Представление же В. В. Лаврова (1948) и Г. Е. Быкова (1938) о том, что ледниковые воды блуждали по Тургайской низменности, не является правильным.

Литература

- Бер А. Г. (1938). Неогеновые и четвертичные отложения Ишима и низовьев Тобола. Бюлл. МОИП, отд. геологии, т. XVI, вып. 1. — Бер А. Г., А. И. Боровиков, Е. И. Бойцова и Н. К. Овечкин. (1948). Геологическая карта СССР, масштаба 1:1000000, л. М-41 (Тургай). — Быков Г. Е. (1938). Геологический очерк бассейна озера Убоган. Изв. ВГО, т. 70, вып. 6. — Крашенинников И. М. (1951а). К истории развития растительных ландшафтов Западной Сибири. В сб. И. М. Крашенинников. Географические работы. Географгиз. — Крашенинников И. М. (1951б). Киргизские степи как объект ботанико-географического анализа и синтеза. В сб.: И. М. Крашенинников (1951). Географические работы. Географгиз. — Лавров В. В. (1948). Четвертичная история и морфология Северо-Тургайской впадины. Изд. АН КазССР, Алма-Ата.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . X

Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К О Е О Б Щ Е С Т В О С О Ю З А С С Р

В. И. ОРЛОВ

**НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ ОБ ОВРАГАХ
ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ**

Изучению оврагов в Советском Союзе уделяется огромное внимание. В опубликованной литературе, в докладах конференций, совещаний достаточно хорошо освещались вопросы оврагообразования. Исследованиям оврагов посвящены классические исследования В. В. Докучаева (1949), В. И. Масальского (1897), А. П. Павлова (1898) и др.

Многочисленные работы содержат теоретические выводы и практические рекомендации относительно оврагов европейской части Советского Союза. Отдельные области и районы здесь изучены с исключительной детальностью, что является абсолютно необходимым для практической деятельности сельскохозяйственных, дорожных и прочих организаций. Слабее изучены вопросы оврагообразования других территорий Советского Союза и, в частности, Западной Сибири. Нет ни одной обобщающей работы, в которой можно было бы найти практические рекомендации борьбы с оврагами, сведения об оврагах и вопросах оврагообразования.

Для низменности характерно повсеместное распространение рыхлых или слабо сцементированных, горизонтально залегающих пород, среди которых важное место занимают лёссовидные и пылеватые суглинки, пески, глины, а в северной части низменности нередко встречаются отложения моренного типа с валунами.

Распределение атмосферных осадков в пределах низменности неодинаково. В таежной зоне их выпадает 450—500 мм в год. В степной зоне осадков выпадает около 200—350 мм в год, однако неравномерное накопление снега зимой (снег сдувается с ровных открытых мест в различные углубления) и быстрое таяние его в короткий весенний период способствуют здесь образованию и росту оврагов.

Несмотря на незначительные абсолютные высоты в пределах низменности (150—250 м над ур. м.), заметные колебания относительных высот местности, особенно при переходе от долин к водоразделам, облегчают эрозионные процессы. Отдельные замечания об эрозионной деятельности поверхностных вод в пределах Западно-Сибирской низменности содержатся в некоторых работах по геолого-геоморфологии, географии, ботанике. Большинство исследователей склоняется к мысли о том, что основные современные мезо- и микроформы рельефа низменности обязаны главным образом деятельности воды. Среди эрозионных процессов важное место отводится оврагообразованию. Встречаются и другие мнения. Так, С. Ф. Бискэ (1949) замечает, что в степях Западной Сибири при общих благоприятных оврагообразованию факторах овраги не образуются.

В последние годы нам довелось проводить топографические и географические работы в различных частях Западно-Сибирской низменности, и повсюду мы отмечаем процессы образования оврагов. Многочисленные овраги имеются в долинах рек Оби, Иртыша и его притоков. Значитель-

ному овражному расчленению подвержены участки низменности, примыкающие к Уральским и Алтайским горам. Приведем примеры.

1. На р. С. Сосьва (левый приток Оби), ниже устья р. Ляпин, на высоком (до 32 м) левом берегу, расположено сел. Сосьвинская Культбаза. За узкой дренированной полосой, прилегающей к реке, здесь раскинулась обширная заболоченная тайга. Часть поверхностных вод в центре поселка была спущена канавой. Не прошло и двух-трех лет, как небольшая канава превратилась в растущий овраг. Овраг имеет V-образную форму; верхние части склонов образуют вертикальные стенки. Глубина оврага достигает 20—25 м при ширине 50—100 м.

2. На территории г. Новосибирска развиваются овраги значительных размеров. Длина их измеряется километрами, глубина десятками, а ширина сотнями метров. Овраг на северной окраине города отличается крутыми склонами. Рыхлые породы здесь отваливаются глыбами, рассыпаются, легко размываются водой и уносятся. Дно оврага представляет собой плоскую, широкую площадку, которая разрастается по мере отступления склонов оврага. Надо отметить, что древесная растительность почти не оказывает заметной роли в задержании роста оврага. Продолжая расти в длину, овраг заметно увеличивает свою площадь за счет быстрорастущих боковых отвершков. Отличительной особенностью оврага, проходящего посреди города, является то, что у него при современном уровне базиса эрозии (урез воды р. Оби) не наблюдается дальнейшего углубления долины. Склоны оврага продолжают разрушаться, образуют крутые, а в некоторых местах вертикальные стенки. В поперечном профиле овраг имеет корытообразную форму, причем дно его имеет вид обширной (шириной от 80 до 200 м), слабо наклоненной, вытянутой во всю длину оврага площадки, которая в черте города занята несколькими улицами. Огромную роль в росте оврага имеет поверхностный сток с прилегающих к оврагу улиц города.

3. Город Тюмень разделен оврагами на несколько частей, что, конечно, причиняет большие неудобства. Овраги имеют широкую сеть отвершков, которые до сего времени продолжают расти. В связи с наличием большого количества оползней, обвалов и промоин городские строения приходится переносить на новые участки. Отличительной особенностью оврагов г. Тюмени служит чрезмерное увлажнение их днщ в результате обильного просачивания у основания склонов грунтовых вод: здесь много болот. Склоны оврагов вверху крутые, однако редко образуют вертикальные стенки и во многих случаях задернованы.

Наиболее распространены овраги в степных районах Западно-Сибирской низменности, в частности в Кулундинской степи. Приведем примеры.

4. На левом, пологом (от 3 до 12°) склоне долины р. Бол. Речка (правый приток р. Оби), сложенном рыхлыми суглинками, южнее с. Троицкое, за последние четыре года сильно разросся овраг; длина его около 1½ км, глубина до 25—30 м, ширина оврага до 100—150 м. Большое количество боковых отвершков сильно увеличивает площадь оврага, разрастающегося во все стороны. Овраг быстро растет особенно при таянии снега и во время дождей. За весну 1952 г., например, он увеличился в длину до 40 м, соответственно разрослись и его боковые отвершки.

В поперечном профиле овраг имеет корытообразный вид. Вертикальные стенки склонов, высотой до 5—10 м, обваливаются. Естественные условия для оврагообразования здесь были усилены деятельностью человека: на заброшенной площадке поля, вокруг оврага, нам удалось обнаружить следы пахоты, которая проводилась в доль склона.

5. Весной 1954 г. нам довелось обследовать овраг, который рассекает Приобское степное плато западнее г. Барнаула. Овраг этот протяжением более километра, отличается незначительной глубиной (5—6 м) и слабой разветвленностью, хотя и имеет коленчатые очертания. Его вертикальные склоны становятся более пологими у плоского дна, имеющего ширину до 30 и более метров. Овраг продолжает активно расти за счет разрушения склонов, которые как бы расступаются, оставляя за собой ровную площадку дна.

Отличительные особенности оврагов Западно-Сибирской низменности. 1. Овраги развиваются повсеместно и особенно в приречных районах. В степях Западно-Сибирской низменности важную роль в образовании оврагов играют не столько летние атмосферные осадки, сколько быстрое таяние снега в короткие весенние периоды, когда возникают кратковременные, но бурные водные потоки, сильно разрушающие рыхлые отложения. Нередко процессы оврагообразования ускоряются неправильной деятельностью человека.

2. Овраги быстро врезаются в рыхлые породы сравнительно приподнятых, плоских или слабо наклоненных частей водоразделов и речных террас. При росте боковых откосов сильно увеличивается площадь оврагов. Склоны оврагов крутые, нередко отвесные. Рыхлые породы при незначительном количестве воды отваливаются глыбами или в виде столбов (призм), легко размываются и выносятся, подчас не образуя даже конусов выноса.

3. Большинство оврагов низменности имеет ясно выраженные днища, которые, как правило, формируются во второй стадии развития оврагов; они нередко заболочены. На определенном этапе, при более постоянном уровне базиса эрозии, вырабатывается устойчивая кривая продольного профиля оврага, после этого решающую роль в жизни оврага приобретает разрушение крутых склонов, сложенных рыхлыми породами.

4. В первой стадии овраги в поперечном профиле имеют V-образную форму, а во второй корытообразную.

5. Роль растительного покрова в задержании роста оврагов часто незначительна.

Образование оврагов приурочено к склонам форм мезорельефа. Поэтому при распашке целинных земель нужно постоянно учитывать особенности рельефа местности и в частности характер склонов.

Географические условия Западно-Сибирской низменности отличаются от условий Европейской части СССР. Поэтому установленные для Европейской части закономерности формирования оврагов, а равно меры предупреждения последних и борьбы с ними не могут быть перенесены полностью на Западную Сибирь.

Литература

- Бискэ С. Ф. (1949). Овраги. (Опыт физико-географической характеристики оврагов на примере Европейской части СССР). Уч. зап. ЛГУ, № 104, сер. геогр. наук, вып. 5, 39.—Герасимов И. П. (1934). Материалы к геоморфологии Кулундинской степи. Кулунд. экспедиция АН СССР, ч. 3, Тр. Сов. по изуч. производ. сил.—Докучаев В. В. (1949). Способы образования речных долин Европейской России. Избр. соч., т. 2, М., Сельхозгиз.—Масальский В. И. (1897). Овраги черноземной полосы России, их распространение, развитие и деятельность. СПб.—Москвитин А. И. (1952). Происхождение рельефа степного Приобья. Изв. АН СССР, сер. геол., № 2.—Нагорский М. П. (1947). Следы древней долины р. Чулыма в Томском районе. Вест. Зап.-Сиб. геол. упр., вып. 5.—Павлов А. П. (1898). О рельефе равнин и его изменениях под влиянием работы подземных и поверхностных вод. Землеведение, кн. 3—4.—Панадиадис А. Д. (1953). Барабинская низменность. Географиз, М.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И И С Б О Р Н И К . Х
ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО СОЮЗА ССР

И. Я. ЕРМИЛОВ

**ОРИГИНАЛЬНЫЕ ФОРМЫ СКУЛЬПТУРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА
НА ПОЛУОСТРОВЕ МАНГЫШЛАК**

Широко известно, что скульптурные формы рельефа, возникающие в результате ветровой денудации в условиях пустыни и полупустыни, могут быть не только весьма разнообразными по своему характеру, но часто и весьма оригинальными по конфигурации. Их можно различать по внешнему виду, величине, характеру сочетаний, распространению и значению, которое они могут иметь в ландшафте. В областях Средней и Центральной Азии нередки случаи, когда вследствие своего широкого развития такие формы составляют одну из наиболее характерных особенностей ландшафта пустыни. Такими формами являются, например, выглаженные ветром небольшие овальные гряды и конуса, грибообразные столбы — останцы, изрытые пещерами обрывы, отпрепарированные ветром решетчатые формы, называемые иногда каменными кружевами, и т. п.

Формы структурного микрорельефа в условиях пустынного выветривания отличаются также большим разнообразием и могут образовывать в отдельных случаях весьма характерные в морфологическом отношении типы местностей. Особенно своеобразны формы пустынного скульптурного микрорельефа, возникающие на рыхлых песчано-глинистых отложениях, как правило, легко поддающихся действию ветра. На внешнем облике таких форм отчетливо отражаются как их литологический состав, плотность, так и наличие в них твердых включений: гальки, скоплений раковин моллюсков, каких-либо конкреций (фосфоритовых, известковых и т. п.).

Весьма наглядным примером подобных форм может служить своеобразный тип микрорельефа, наблюдающийся в районе развития нижнемеловых (альбских) отложений в западной части п-ова Мангышлак. Эти отложения представлены здесь мощными рыхлыми или слабо сцементированными серыми и зеленовато-серыми кварцевыми песками с прослоями коричневых глин. В виде включений в этих породах содержатся многочисленные конкреции шарообразной или неправильной формы, состоящие из твердых песчаников с известковым, сидеритовым и частью фосфоритовым цементом.

Крупные песчаниковые конкреции с трудом поддаются действию агентов выветривания. Освобождаясь под влиянием ветра от включающих их пород, они скапливаются огромными массами на поверхности гряд, образуя на них своеобразный микрорельеф шаровых конкреций. Покров из таких конкреций прикрывает собой как включающие их слои песков, так и более древние горизонты нижнего мела, являясь в таких случаях своеобразным свидетелем разрушенных горизонтов.

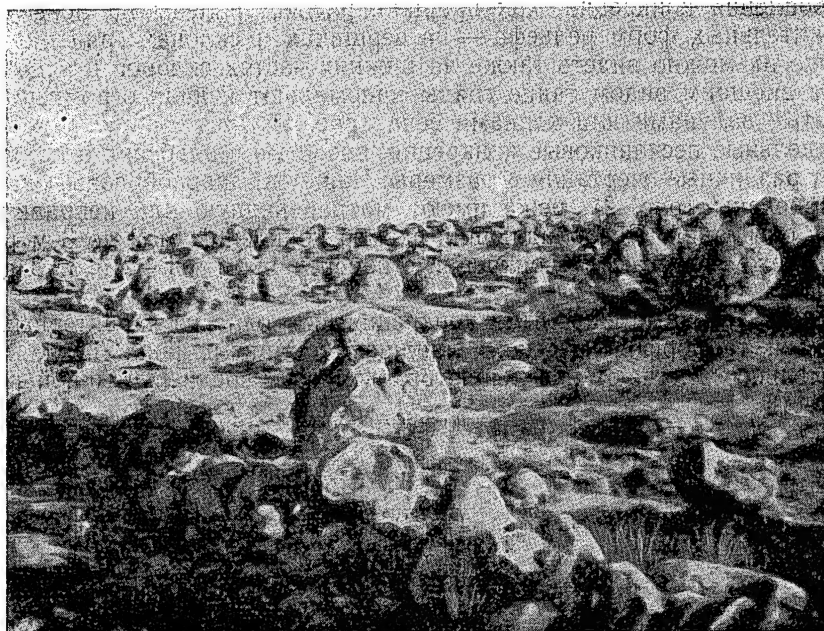


Рис. 1. Вид бугристой поверхности гряды, сложенной альбскими песками с прослоями песчагиковых конкреций (северный склон Кара-тау).



Рис. 2. Овальные и грибообразные формы конкреций альбских отложений (южный склон Кара-тау).

Скопления конкреций, как правило, распространены на поверхности положительных форм рельефа — на вершинах и склонах гряд, но очень нередко их можно видеть также на нижних частях склонов и в долинах. Своим внешним видом такие гряды напоминают издали огромные поля, закрытые валунами или копнами сена (рис. 1).

Отдельные песчаниковые конкреции, развитые в альбских отложениях, имеют различные очертания и размеры. Чаще они шарообразны, овальные, дискообразны (рис. 2), реже имеют матрацевидную или неправильную форму очертаний. Преобладающий размер конкреций от 2 до 3 м в диаметре, реже встречаются конкреции с поперечником в 1—2 и от 3 до 4 м и более.

Гряды, усеянные шаровыми конкрециями, — одна из характерных особенностей геоморфологического ландшафта Мангышлака. Такие гряды значительно облегчают населению ориентировку среди пустынной горной местности.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . Х

Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К О Е О Б Щ Е С Т В О С О Ю З А С С Р

И. А. ВОЛКОВ

СЛЕДЫ ДРЕВНЕГО УЗБОЯ НА ШОРЕ КЕЛЬКОР

Примером того, какие неожиданные открытия могут быть сделаны в результате использования материалов аэрофотосъемки при геоморфологических исследованиях, могут служить обнаруженные во время работ Туркменской экспедиции Лаборатории аэрометодов АН СССР следы многочисленных русел Узоя в северо-восточной части шора Келькор.

Как известно, долина Узоя в районе пересечения ее Ашхабадской железной дорогой переходит в обширное понижение, расположенное южнее г. Небит-Даг и ст. Бала-Ишем. Дно этого понижения имеет отрицательные высотные отметки, близкие к — 25 м, и занято шором Келькор. Поверхность шора в целом исключительно плоская и однообразная.

Авторы, занимавшиеся исследованием приустьевой части Узоя (Кесь, 1939, и др.), считали, что древнее русло при выходе на шор исчезает. Это мнение как будто бы находило подтверждение в том, что некогда большая часть впадины, занятой в настоящее время шором, представляла собой мелководный залив Каспия, на дне которого отлагались пески с морскими раковинами *Cardium edule* L.¹. Наши исследования показали, что указанное предположение не соответствует действительности. Еще во время предварительного изучения (в камеральных условиях) материалов аэрофотосъемки северной части Прибалханского района обнаружилось, что древнее русло Узоя непрерывно прослеживается до меридиана г. Небит-Даг, протягиваясь по шору на 20—25 км. Кроме широкого, четко выраженного в рельефе главного русла Узоя, на поверхности шора наблюдается целая система следов древних русел. Большинство из них отделяется от главного русла в районе разъезда № 16 Ашхабадской железной дороги, где располагается древняя дельта Узоя, и протягивается в западном направлении на значительное расстояние (рис. 1).

Особенно широко распространены следы древних русел южнее главного русла, близ подножья северных склонов возвышенностей Худай-Даг и Монжуклы. Здесь они прослеживаются непрерывно от разъезда № 16 до подножья возвышенности Монжуклы. Некоторые русла продолжают и западнее этой возвышенности, в пределах массива барханных песков, и окончательно исчезают лишь в 8—10 км к северо-востоку от возвышенности Небит-Даг, на расстоянии свыше 30 км от разъезда № 16 (рис. 2).

Наши полевые наблюдения показали, что почти всюду в пределах шора Келькор следы древних русел представлены комплексом положительных форм рельефа. Обычно это — серии линейно вытянутых,

¹ Эти отложения в пределах впадины Келькор имеют широкое распространение и описаны многими авторами (Андрусов, 1905; Кесь, 1939; Федоров, 1946, и др.).

грядобразных останцов, протягивающихся по шору в виде узкого пучка. Чаще всего вершины гряд и гребней возвышаются над общей поверхностью не более, чем на 1 м, но иногда наблюдаются и более высокие останцы, превышающие 2 м. Особенно четко грядовые останцы выражены на поверхности шора севернее пос. Урунджик и возвышенности Монжуклы, где встречаются гряды с относительной высотой до 2.5 м (рис. 3).

Каждый из описанных выше грядобразных останцов сложен одной или несколькими парами наклонно залегающих слоев рыхлых разнозернистых песков и слабо сцементированных глинистых мелкозернистых песков или легких суглинков. Падение слоев весьма быстро изменяется

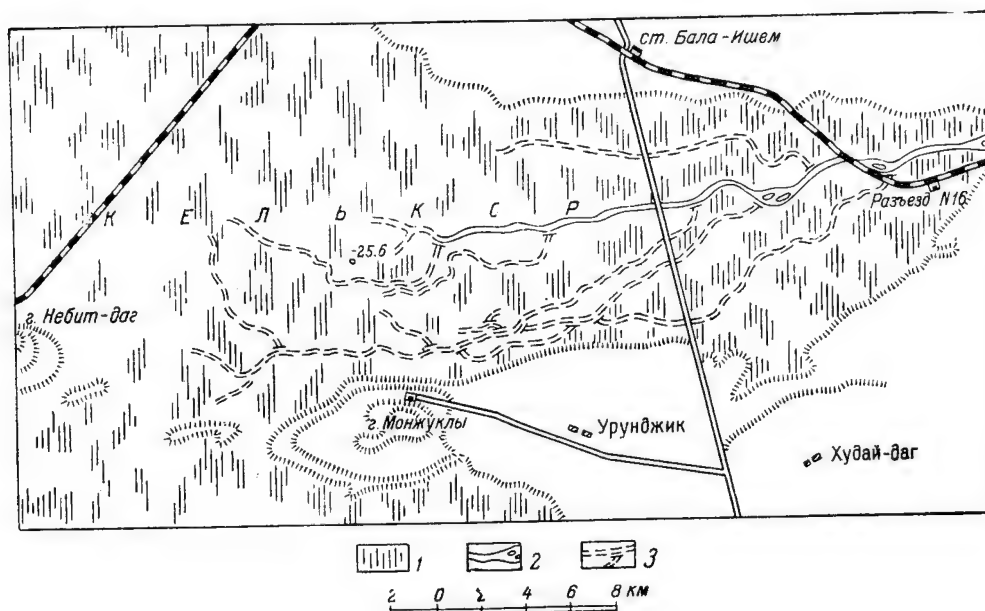


Рис. 1. Следы древних русел Узбоя на поверхности Келькор.

1 — шор, 2 — древнее русло Узбоя, 3 — следы древних русел Узбоя, выраженные в рельефе в виде гряд. Штрихом отделены следы относительно более древнего русла.

от 2—5 до 30° и более. Иногда серии наклонных слоев несогласно перемежаются друг с другом или образуют вытянутые в направлении древнего русла замкнутые контуры «синклинального» или «антиклинального» типа. Обычно же закономерного изменения направления падения слоев подметить не удается.

Есть все основания полагать, что грядобразные останцы возникли в результате селективной дефляции древних косослоистых аллювиальных отложений руслового типа в условиях близкого к поверхности залегания грунтовых вод. Наиболее быстро развеивались песчаные слои, в которых высота капиллярного поднятия грунтовых вод была сравнительно небольшой; наоборот, слои со значительной примесью глинистых частиц, в результате подтягивания к поверхности влаги и слабой цементации внешнего слоя минеральными солями, противостояли дефляции значительно лучше и отпрепарировались в виде грядобразных останцов и гребней. Ввиду того что гряды и гребни возникли вследствие денудации и приуро-

чены к местам древних русел, их можно называть скульптурными русловыми грядами. Нередко, в местах разветвления или слияния двух древних русел, пучок русловых гряд одного из них следует непрерывно, в то время как русловые гряды другого внезапно обрываются. Очевидно, что одно из русел относительно более молодое. Посредством изучения русловых гряд удалось установить относительные возрастные взаимоотношения

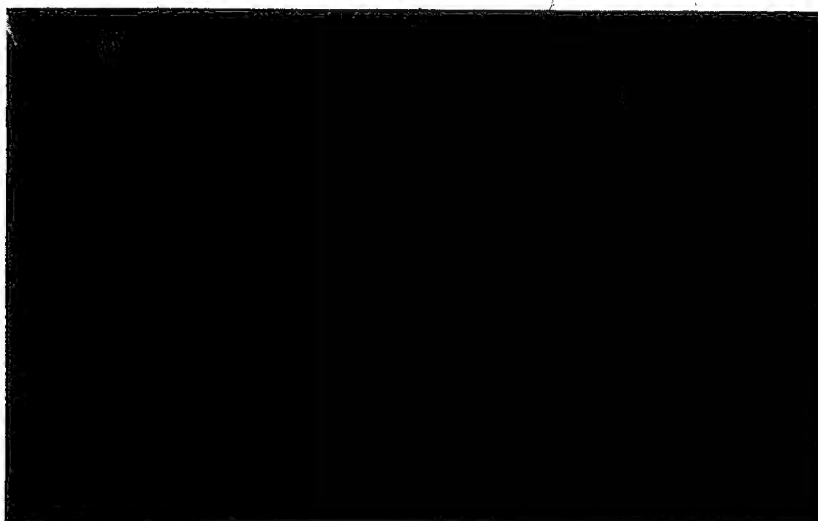


Рис. 2. Следы речного русла в пределах песчаного массива северозападнее возвышенности Монжуклы (аэрофото).

большинства древних русел, наблюдавшихся на шоре. При этом выяснилось, что местами молодые русла приспособляются к более древним. По-видимому, сток вод по Узбою неоднократно прерывался. Когда стока не происходило, русла отчасти развеивались или перекрывались эоловыми отложениями; каждый новый период обводнения сопровождался во впадине Келькор образованием новых водотоков, которые лишь местами использовали старые русла.

Интересно проследить взаимоотношения между руслами древнего Узбоя и новокаспийскими морскими отложениями с *Cardium edule* L. В тех местах, где в пределах впадины Келькор сохранились остатки новокаспийской террасы, можно заметить, что русловые отложения Узбоя перекрываются морскими песками. Главное русло Узбоя, напротив, срывает не только скульптурные русловые гряды всех более древних русел, но и останцы новокаспийской террасы.

Указанные выше факты позволяют наметить четыре основных этапа формирования рельефа впадины Келькор. Система древних русел, наблюдающаяся на шоре, образовалась до новокаспийской трансгрессии, в условиях понижения уровня Каспия и отступления береговой линии моря от дельты Узбоя. В это время конец долины Узбоя представлял собой «покинутую дельту», в понимании М. М. Жукова (1945), западная

12 Географический сборник, вып. X.

же часть впадины Келькор была занята сообщавшимся с морем пресноводным озером. Новокаспийская трансгрессия происходила в условиях отсутствия притока пресных вод Узбоя, так как новокаспийские отложе-



Рис. 3. Скульптурные русловые гряды на поверхности шора Келькор севернее пос. Уруцджик.

ния содержат фауну нормальной для Каспия солености. После отступления моря произошел новый, сравнительно кратковременный прорыв вод по Узбою, во время которого окончательно сформировалось его глав-

ное русло¹. Этот прорыв, по-видимому, соответствует по времени высокому стоянию Сарыкамышского озера в средние века (Ямнов и Кунин, 1953).

Наконец, в настоящее время во впадине Келькор происходит интенсивная дефляция всех рыхлых отложений, расположенных выше верхней границы капиллярного поднятия грунтовых вод. На значительных пространствах верхняя часть новокаспийских отложений полностью снесена, и развеванию подвергаются уже древние аллювиальные отложения Узбоя.

Дальнейшее изучение следов древних речных русел, наблюдающихся на дне впадины Келькор, представляет исключительный интерес, так как оно будет способствовать выяснению важнейших вопросов истории долины Узбоя и всего Каспия.

Литература

- Андрусов Н. И. (1905). Материалы для геологии Закаспийской области. Тр. Арало-Касп. экспед., вып. VII, VIII. — Жуков М. М. (1945). Плиоценовая и четвертичная история севера Прикаспийской впадины. Сб. «Проблемы Западного Казахстана», т. II, Изд. АН СССР. — Кесь А. С. (1939). Русло Узбоя и его генезис. Тр. Инст. геогр. АН СССР, т. XXX. — Федоров П. В. (1946). К стратиграфии каспийских отложений Прибалханского района. Сов. геология, № 11. — Ямнов А. А. и В. Н. Кунин (1953). Некоторые теоретические итоги новейших исследований в районе Узбоя в области палеогеографии и геоморфологии. Изв. АН СССР, сер. геогр., № 3.

¹ Таким образом, вследствие периодичности стока вод по Узбою, с одной стороны, и колебаний уровня Каспия, с другой, во впадине Келькор происходило чередование дельтовых, озерных и морских условий. Эта смена условий получила отражение в осадках и рельефе впадины.

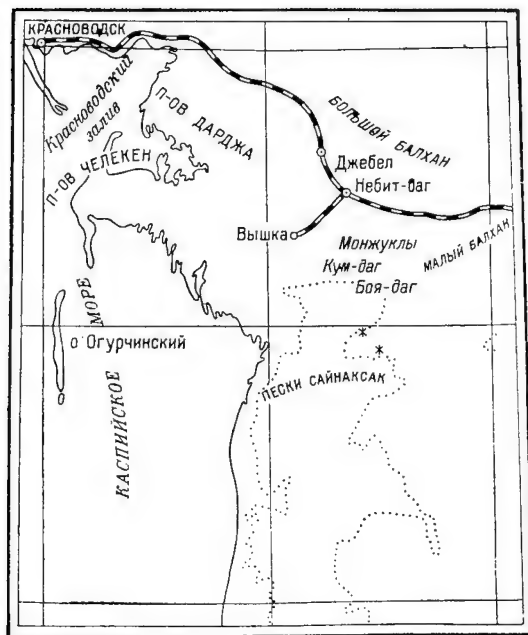
А. И. БАРАНОВА

О НОВОЙ НАХОДКЕ *CARDIUM EDULE* L. В ЮГО-ВОСТОЧНОМ ПРИКАСПИИ

Во время полевых исследований 1952 г. на территории Прикаспийской низменности в юго-западном Туркменистане нами был встречен в двух пунктах моллюск *C. edule*.

Одна из находок *C. edule* приурочена к северо-восточной окраине песчаного массива Сайнаксак, представляющего собой в общем валообразную возвышенность, вытянутую в широтном направлении. Эта возвышенность сложена переветренными хвалынскими отложениями, представленными мелкозернистым, сортированным, косослоистым песком.

Абсолютные отметки здесь колеблются от 20 до 50 м, относительные же колебания высот в пределах развитого здесь грядово-лункового рельефа достигают 20—30 м. По северной периферии песков Сайнаксак наблюдается пониженная зона дефляционного происхождения, которая характеризуется наличием останцового рельефа. *C. edule* встречен здесь на абсолютной высоте около 20 м по склону и в основании небольшого останца хвалынских отложений, также представленных мелкозернистым, сортированным, косослоистым, желтовато-серым песком. Кроме *C. edule*, здесь встречены раковины *Monodacna edentula* (Pall.) var. *caspia* Eichw.¹.



Обзорная карта восточного побережья Каспийского моря.

Крестиками обозначены пункты находок *Cardium edule* L.

Вторая находка *C. edule* L. var. *rusticum* Lam., также вместе с раковинами *Monodacna edentula* (Pall.) var. *caspia* Eichw., приурочена к ниж-

¹ Определение фауны произведено проф. М. А. Лавровой.

нему участку долины Гяурли (несколько южнее Боя-Дага), к абсолютной отметке около 0 м. Здесь *C. edule* встречен прямо на поверхности солончака, развившегося на отложениях продуктов деятельности горячих источников Боя-Дага. Несомненно, что *C. edule* здесь находится не *in situ*, а во вторичном залегании, но несомненно также и то, что если он и перенесен временными потоками Гяурли, первичное его нахождение было приурочено к еще большей абсолютной высоте. В обоих пунктах *C. edule* встречен в большом количестве экземпляров, причем внешний облик раковин свидетельствует о благоприятных экологических условиях жизни этого моллюска.

Прежде чем сделать некоторые предположения о времени проникновения и расселения в Каспии данного моллюска, обратимся к краткому обзору данных предыдущих исследований по этому вопросу.

Вопрос о распространении в районах южных морей СССР моллюска *C. edule* поднимался в литературе с давних пор. Так, например, еще Э. Эйхвальд (1850) писал, что «раковины *Mytilus polymorphus*, *Cardium edule* и *C. rusticum*, *Monodacna caspia* (*M. hiantulum* Ag.), *Didacna trigonoides*, *Adacna edentula* и др. наполняют повсюду речной песок реки Волги, начиная от Царицына, лежащего более чем на 32 фута ниже уровня Черного моря, до самого города Астрахани». И. В. Мушкетов в 1884—1885 гг. в Калмыцкой степи, к западу от Астрахани, встречал *C. edule* в прибрежье Каспия на незначительной высоте над его уровнем. На ничтожной высоте над морем обнаружил отложения с *C. edule* Н. И. Андрусов. П. А. Православцев в одной из своих работ (1902) указывал на нахождение *C. edule* L. вместе с другими видами *Cardium* и прочей каспийской фауной в устье р. Солянки, на берегу оз. Эльтон. Здесь *C. edule* встречен среди тонкослоистых, желтых песков и слоистых, светло-бурых песчаных глин на высоте около 30 м над уровнем Каспия. Последующие исследования, однако, заставили П. А. Православлева (1904) усомниться в правильности предыдущего определения.

Сведения о распространении моллюска *C. edule* появлялись в литературе и позднее. Д. Голубятников (1914) писал, что «для Каспийского моря, по крайней мере для Апшеронского полуострова, побережья Каспия от Баку до Петровска и для о. Челекена, надо считать установленным нахождение раковин этого моллюска (т. е. *C. edule*, — А. Б.) около 2—5 м над уровнем современного Каспия как нормальное явление. Исключение — Биби-Эйбат, где он найден на 9.1 м. На о. Святом террасы слоев с *C. edule* поднимаются до 14 м над Каспием, но здесь мы имеем своеобразную, может быть, отжившую форму *C. edule*, так как подобной формы нигде на полуострове не удалось найти» (стр. 86).

В работах М. В. Баярунаса (1932), М. Ф. Двали, Г. А. Лебедева и Л. А. Никитюк (1932) содержатся также указания на то, что отложения с *C. edule* на равнине в районе Кара-бугаза не наблюдаются на отметках выше 4—8 и 10 м. Здесь *C. edule* L. встречается среди песков с прослоями ракушечников и мелкой гальки в наиболее пониженных местах равнины, по берегам соляных озер и шоров. Из наиболее поздних работ, в которых так или иначе затрагивается вопрос о распространении *C. edule*, отметим работы А. С. Кесь (1939, 1952), П. В. Федорова (1946), Б. А. Федоровича (1952) и др. Для всех них характерно, что отложения с *C. edule* не отмечаются на побережье Каспия выше отметок 5—7 м над ур. м.

Таким образом, данные различных авторов о высотном положении прибрежных осадков с *C. edule* в общем сходятся. По находкам моллюска

C. edule, живущего в Каспийском море и в настоящее время, отмечаются следы максимального стояния уровня Новокаспийского моря, которое, по-видимому, не превышало 5—7 м. Отдельные указания на более высокое залегание осадков с *C. edule* многими авторами подвергаются сомнению или же относятся к таким местам, где известны новейшие локальные поднятия (Берг, 1949, стр. 216; Леонтьев и Федоров, 1953).

Параллельно с вопросом о распространении *C. edule* поднимался в литературе вопрос о времени и способе проникновения этого моллюска как в Каспий, так и в Арал. Однако соображения по этому вопросу вследствие недостаточности данных о распространении *C. edule* носили скорее характер догадок. Тем не менее Л. С. Берг (1908), в согласии с Н. И. Андрусовым, относил время соединения Средиземного моря с Черным и проникновения *C. edule* активным путем по Манычу в Каспий ко второй межледниковой эпохе (если иметь в виду три оледенения). Тем же активным путем, по мнению Л. С. Берга, *C. edule* из Каспия мог проникнуть через Узбой в Аральское море в период, когда уровень Каспия был на 10—15 м выше современного.

Еще раньше Остроумов высказал предположение о проникновении *C. edule* в Каспий и Арал при помощи водоплавающих птиц. Однако этот способ, как писал Л. С. Берг (1908, стр. 518), «является для нашего моллюска весьма гипотетичным». В последнее время различные авторы отрицают возможность активного проникновения *C. edule* в Каспий, Сарыкамыш и Арал. Так, сравнительно недавние находки Н. П. Лупповым (1946) *C. edule* в Сарыкамыше в 10 обособленных котловинах на различных высотах приводят как самого автора, так и ряд других исследователей (Федорович, 1952; Кесь 1952) к полному отрицанию возможности активного проникновения из Каспия раковин *C. edule* в Сарыкамышское озеро. Те же по существу выводы о пассивном проникновении этого моллюска в Каспий, а также в Сарыкамыш и Арал мы находим в новейших работах О. К. Леонтьева и П. В. Федорова (1953) и А. А. Ямнова (1953). Однако следует отметить, что Л. С. Берг в своей последней крупной работе «Географические зоны СССР» стоит по-прежнему на точке зрения активного проникновения *C. edule* в Сарыкамыш и Арал, ссылаясь на свои прежние находки *C. edule* вместе с каспийскими видами у восточного берега Арала в ископаемом состоянии.

Возвращаясь к новым находкам *C. edule* в исследованном районе, напомним, что на северной периферии песчаного массива Сайнаксак *C. edule* нами встречен в хвалынских отложениях на абсолютной высоте около 20 м. Простейшие расчеты свидетельствуют о том, что *C. edule* проник в Каспий в максимальную стадию Хвалынского моря. Известно, что нормальная глубина обитания этого моллюска в Каспийском море колеблется от 0 до 15 м, не превышая 35 м (Гримм, 1877).

Прибавляя отметку средней глубины обитания *C. edule* к абсолютной отметке наиболее высоко расположенной находки его, получим возможную абсолютную высоту береговой линии Хвалынского моря во время проникновения и обитания *C. edule*. Таким образом, на основании сопоставления полученных цифр наиболее вероятной является абсолютная высота береговой линии в 35 м (63 м над современным уровнем Каспия).¹

¹ О проникновении *C. edule* в Каспий именно в максимальную стадию Хвалынского моря говорят еще следующие данные. При бурении в районе западного побережья Каспия установлено нахождение *C. edule* в террасе Каспия высотой 42 м над уровнем

Геологические условия нахождения *C. edule* L. var. *rusticum* Lam., а именно приуроченность его к хвалынским отложениям (по крайней мере, на северо-восточной окраине песков Сайнаксак), исключают возможность объяснять его высокое гипсометрическое положение только новейшими тектоническими движениями. Если хвалынские отложения здесь и приподняты сколько-нибудь относительно своего первоначального положения, то совсем немного: судя по глубине вреза послехвалынских эрозийных ложбин восточнее песков Сайнаксак, где амплитуда поднятия должна быть больше, последняя в районе нахождения хвалынских отложений с *C. edule* не может превышать 5 м. Таким образом, возможные тектонические движения здесь не могут изменить общей картины и вывода о том, что *C. edule* L. проник в Каспий в максимальную стадию Хвалынского моря.

Приведенных нами данных о распространении на территории Прикаспийской низменности в юго-западном Туркменистане раковин *C. edule*, безусловно, недостаточно для того, чтобы на основании их опровергать установившееся в настоящее время в литературе мнение о невозможности активного проникновения его в Каспий, Сарыкамыш и Арал. Однако внешний облик раковин этого моллюска, как уже сказано выше, говорит о нормальных экологических условиях жизни *C. edule* L. в хвалынское время (максимальную его стадию), допускающих возможность некоторого расселения его уже в то время. В таких условиях вполне допустима, по нашему мнению, возможность активного проникновения *C. edule* по Узбою в Сарыкамыш.

Литература

- Баярунас М. В. (1932). К геологии Карабугаза. Изв. Всесоюз. геол.-развед. объедин., вып. 50.—Берг Л. С. (1908). Аральское море. СПб.—Берг Л. С. (1949). Уровень Каспийского моря за историческое время. Очерки по физ. географии, М.—Л.—Голубятников Д. (1914). Детальная геологическая карта Апшеронского полуострова. Биби-Эйбат. Тр. Геол. ком., № 106.—Гримм О. А. (1876—1877). Каспийское море и его фауна. Тр. Арало-Касп. экспед., вып. II, Тетрадь I, II.—Двали М. Ф., Г. А. Лебедев, Л. А. Никитюк. (1932). Геологические и гидро-геологические исследования Красноводского п-ва. Тр. Геол.-развед. объедин., вып. 179.—Кесь А. С. (1939). Русло Узбой и его генезис. Тр. Инст. географии АН СССР XXX.—Кесь А. С. (1952). Происхождение Узбоя. Изв. АН СССР, сер. геогр., № 1.—Леонтьев О. К. и П. В. Федоров. (1953). К истории Каспийского моря в поздне- и послеледниковое время. Изв. АН СССР, сер. геогр., № 4.—Луппов Н. П. (1946). О распространении *Cardium edule* в районе Сарыкамышской впадины. Пробл. физ. географии, XII.—Мушкетов И. В. (1895). Геологические исследования в Калмыцкой степи в 1884—1885 гг. Тр. Геол. ком., XIV, № 1.—Православлев П. А. (1904). Имеются ли *Cardium edule* в нижневолжских каспийских отложениях. Труды и протоколы заседания Варшавск. общ. естествоиспыт., отд. биол., XV (1904), протокол 30 января 1904 г.—Федоров П. В. (1946). К стратиграфии каспийских отложений Прибалханского района (Туркмения). Сов. геология, № 11.—Федорович Б. А. (1952). Древние реки в пустынях Турана. Матер. по четверт. периоду СССР, вып. 3.—Эйхвальд Э. (1850). Палеонтология России. Описание молассовой и намывной формации. СПб.—Ямнов А. А. (1953). О признаках обводнения Сарыкамышской котловины в средние века и возрасте сарыкамышских отложений с *Cardium edule*. Изв. АН СССР, сер. геогр., № 4.

моря, на глубине 43 м от поверхности террасы, под отложениями с хвалынской фауной. Таким образом, высота нахождения *C. edule* здесь составляет 27 м над современным уровнем Каспия. Нахождение же его под отложениями с несомненной хвалынской фауной свидетельствует о проникновении его в Каспий в ранние фазы Хвалынского моря.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . Х
 Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К О Е О Б Щ Е С Т В О С О Ю З А С С Р

Г. М. ВЛАСОВ

**ЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ОЛЕДЕНЕНИЯ
 СЕВЕРНЫХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ**

В литературе отсутствуют какие-либо указания на четвертичные оледенения Курильских островов. Только В. Н. Васильев при описании растительности островов Курильской дуги предположил их недавнее значительное оледенение. Такое предположение основано на наличии в этом районе обедненной растительности и разрыва ареалов многих флористических видов. На Северных Курильских островах отсутствует, например, каменная береза Эрмана, широко распространенная на Южных и Средних Курильских островах и на Камчатке. Имеются на Южных Курильских островах, отсутствуют на Северных и появляются вновь на Камчатке осина, ольха волосистая, аянская ель и многие другие виды. Причиной обедненной растительности Северных Курильских островов, по мнению В. Н. Васильева, могло быть мощное четвертичное оледенение, нацело уничтожившее здесь многие растительные виды и целые формации (Васильев, 1946).

Другого мнения о причине гибели многих растительных (и животных) видов на Курильских островах придерживается Н. Н. Конаков (1947). Эту причину он видит в сильных вулканических извержениях, уничтоживших частично или полностью большинство биоценозов. «Молодой вулканизм Курил,— пишет Н. Н. Конаков,— является ведущим фактором формирования современной флоры и фауны».

Наконец, можно привести третье мнение, высказываемое некоторыми дальневосточными лесоводами, о том, что обедненная растительность Северных Курильских островов стоит в связи с современными неблагоприятными климатическими и почвенными условиями (сильные ветры, гольцовый рельеф с каменистыми осыпями и т. д.).

Наши наблюдения при работах в 1952—1954 гг. на самом крупном острове в северной части Курильской дуги — Парамушире — подтверждают предположение В. Н. Васильева о гибели многих растительных видов в результате оледенений. В противоположность южным островам Курильской дуги, на которых отсутствуют какие-либо следы ледников (Корсунская, 1947), северные острова в четвертичное время подвергались сильным оледенениям. Следы их в виде троговых долин, морен, шлифованных скал, бугристо-озерного ледникового ландшафта на Парамушире почти повсеместны. Они относятся не менее чем к двум ледниковым эпохам. Кроме следов былых оледенений на Парамушире имеются небольшие современные ледники.

Главная масса древних ледниковых отложений находится на абсолютных отметках в 300—400 м в нескольких (до 10—12) километрах от

современного морского берега. Здесь днища древних ледниковых трогов сливаются с поверхностью высокой (250—400 м) морской террасы, окаймляющей центральную гористую часть Парамушира. У места перехода днища трогов в террасу располагаются конечные морены с хорошо выраженным западинно-бугристым рельефом. Судя по высоте холмов между небольшими озерами и обнажениями обрывов, мощность моренного материала достигает нескольких десятков метров. Моренный материал состоит из андезитовых глыб со слабо сглаженными углами и гранями, редко имеющими вид валунов; глыбы покрыты ледниковыми шрамами. Промежутки между крупными обломками заполнены гравийно-щебенчатой или суглинисто-щебенчатой массой. Нередко моренный материал сильно лимонитизирован или даже сцементирован гидроокислами железа (рр. Горшкова, Заозерная, Северянка и др.).

От конечных морен в глубь Парамушира протягиваются желобообразные трог, значительная часть днища которых покрыта боковыми и донными моренами. Последние прекрасно выражены в верховьях р. Заозерной на высоте 450—500 м над современным уровнем моря. Общий разрез троговой террасы здесь имеет следующий вид (снизу):

1. Валун и глыбы андезитов, сцементированные суглинисто-лимонитовым цементом (донная морена) более 12 м.
2. Тонкослойные глинисто-гравийные отложения с белой щебенкой измененных пород (флювиоглациальные отложения) от 1 до 3 м.
3. Частое переслаивание тонких (0.5—3.0 см) слоев торфа и вулканического пепла (последнеледниковые вулканические отложения) более 1.5 м
4. Гумусовый слой, местами торф от 0.5 до 2.0 м

Боковые морены в древних ледниковых трогах представляют беспорядочное нагромождение глыб и щебня, местами с примесью суглинков. На первый взгляд этот материал похож на делювий, однако при внимательном его осмотре сразу же обнаруживается, что с делювием он имеет мало общего: материал прежде всего слишком разнообразен по составу и величине обломков. Больше он похож на пролювий (за который и принимался предыдущими исследователями острова — Ю. С. Желубовским и др.), но характер распределения материала вдоль борта указывает на отсутствие влияния на это распределение потоков, стекающих в троговую долину по боковым ущельям. Громадные глыбы, встречающиеся в морене и достигающие нескольких десятков кубических метров не могли бы быть перенесены даже сильными горными потоками. Вместо отдельных конусов выноса, свойственных пролювию, в пределах боковых частей трога наблюдается почти сплошной покров глыбовых отложений. Бесспорно вопрос в пользу ледникового происхождения грубообломочного материала решают часто встречающиеся на глыбах ледниковые шрамы и шлифованные поверхности скал, к которым прилегают боковые морены.

Древние ледниковые трог Парамушира прслеживаются в глубь острова (и вверх) до выровненных поверхностей, являющихся характерной особенностью рельефа острова. Несмотря на сильную расчлененность Парамушира, на нем отчетливо выделяется общая сnivelлированность горных возвышенностей под два уровня (не считая морских террас): высотой 500—600 и 800—900 м. На выровненных поверхностях возвышаются современные вулканы. Ранее эти поверхности принимались за эффузивные плато. Однако при более внимательном изучении установ-

ливается, что они представляют поверхности выравнивания, обязанные своим происхождением экзогенным факторам. Это достаточно определено доказываем, во-первых, примерным совпадением отметок ровных поверхностей в различных частях острова, во-вторых, явным несогласием их со структурой субстрата, на котором они развиты. В высоких обрывах по долинам рек видно, как наклоненные в различные стороны лавовые потоки и слои туфобрекчий, слагающие платообразные возвышенности, подходят под тем или иным углом к выровненным поверхностям, имеющим всегда наклон в сторону моря. Существование выровненных поверхностей невулканического происхождения установлено и на других островах Курильской дуги.

Значительная часть площади выровненных поверхностей Парамушира покрыта ледниковыми отложениями. Подобная картина вызывает предположение о «шапках» льда, некогда лежавших на сглаженных вершинах острова, от которых к морю спускались мощные глетчеры. Судя по шлифованным скалам в троговой долине р. Заозерной, мощность льда здесь превышала 100 м.

Троги молодого оледенения наблюдаются в большинстве крупных современных речных долин Парамушира и, в отличие от трогов древнего оледенения, протягиваются непосредственно до морского берега. Здесь располагаются конечные морены, выраженные в рельефе озерно-холмистым ландшафтом (рр. Зеленая, Северянка, Обрывистая и др.). Днища ледниковых трогов у морского берега постепенно сливаются с 15—20-метровой морской террасой.

Характерным отличием молодых ледниковых отложений от древних, кроме их гипсометрического положения и литологического состава, является рыхлость обломочного материала, в противоположность крепко сцементированному лимонитом моренам древнего оледенения.

Особенно отчетливо трог и конечная морена молодого оледенения выражены в долине р. Северянки. У устья этой реки в море выступает полуостров, сложенный крупнообломочным ледниковым материалом. Состав обломков свидетельствует о транспортировке его с приводораздельных площадей острова. Громадный размер (до сотни кубических метров) некоторых глыб со сглаженными ребрами и ледниковыми шрамами указывает на большую транспортирующую силу ледника. В береговых обрывах глыбовые и валунно-щебенчатые ледниковые образования наблюдаются на протяжении нескольких километров. Далее, в удалении от устья реки, они постепенно переходят в морские песчано-галечниковые отложения 15—20-метровой морской террасы.

Местами ледники, спустившись по долинам с гор, сливались вблизи моря в общий ледниковый покров и образовывали здесь гряды конечных морен с мелкими озерами, непрерывно протягивающиеся вдоль берега на протяжении до 20 км. Такая картина наблюдается у южной оконечности Парамушира между устьями рр. Большой и Лесной.

В некоторых долинах острова можно наблюдать как трог недавнего оледенения, так и древнеледниковые троговые террасы. Например, в верховьях р. Зеленой древний ледниковый трог расположен на абсолютной отметке 600—700 м и является в настоящее время висячим. Более молодой трог находится ниже на 200 м и протягивается до берега моря, где располагаются гряды конечных морен.

Троги молодого оледенения прослеживаются до главных водоразделов острова, где они обычно заканчиваются ригелями, за которыми следуют котловины-цирки.

Небольшие современные ледники на Парамушире имеются на тихоокеанском склоне хребта Вернадского, у вулкана Билибина¹ и в верховьях р. Левашева. Длина ледников не превышает 2 км, мощность — 40—50 м. Абсолютные отметки верхних краев ледников составляют около 1000 м, нижних — 500—600 м. Развитие здесь ледников на столь небольших высотах связано с большими массами снега, скопляющимися зимой. Склон хребта Вернадского, обращенный к Охотскому морю, представляет полого наклоненную к морю, почти ровную поверхность (900-метровый уровень планации), тихоокеанский же склон хребта крутой, обрывистый. Сильные зимние ветры преобладающего «охотского» направления сдувают снег с пологого охотского склона хребта и надувают его под восточными обрывами. Этот снег питает ледники, спускающиеся из-за крутизны ложа и неблагоприятных летних климатических условий до относительно низких отметок.

Разновременность следов оледенения на Парамушире, наличие там не менее двух комплексов ледниковых образований не может вызывать сомнений. Естественно возникает вопрос, каков возраст этих образований?

Очевидно, древние ледниковые отложения Парамушира одновременны отложениям 250—400-метровой террасы, молодые ледниковые отложения — замещающим их морским осадкам 15—20-метровой морской террасы. При неразработанности стратиграфии четвертичных отложений Дальнего Востока определить точный возраст указанных террас не представляется возможным; приближенно он определяется как древнечетвертичный и позднечетвертичный. Это согласуется со всеми прочими особенностями ледниковых образований Парамушира, а также с материалами о четвертичных оледенениях соседней территории Камчатки.

Древние ледниковые трог Парамушира прорезаны ущельями (по которым текут современные реки) на глубину более 100 м, молодые трог — не более чем на 8—20 м; в молодые ледниковые отложения непосредственно вложены отложения современных речных пойм.

В составе обломочного материала древнечетвертичных морен изобилуют обломки характерных коричневых плитчатых андезитов, залегающих на неогеновых отложениях в основании четвертичных вулканических толщ Парамушира. С другой стороны, в этом обломочном материале отсутствуют темные андезитовые лавы с щелеватыми порами, слагающие молодые лавовые потоки и в большом количестве встречающиеся в молодых ледниковых отложениях.

Древние ледниковые отложения на Парамушире местами слабо дислоцированы. В верховьях р. Заозерной днище трога разбито разломом, вдоль которого восточная часть опущена по отношению к западной примерно на 20 м. В нескольких десятках метров от разлома флювиогляциальные суглинки, лежащие на древнеледниковой морене, смяты в небольшие, крутые, местами разорванные складки. В молодых ледниковых образованиях следов тектонических дислокаций не наблюдается.

На соседней Камчатке число четвертичных оледенений точно не установлено, но отчетливы следы двух оледенений — древнечетвертичного и позднечетвертичного. Первое развилось вскоре после позднеплиоценовых поднятий. Остатки трогов этого оледенения сохранились местами в горных районах Камчатки на абсолютных отметках более 400—500 м. Второе, позднечетвертичное, оледенение Камчатки оставило отчетливые

¹ Назван нами в 1952 г. в честь советского геолога Ю. А. Билибина.

следы в виде молодого рельефа многих горных районов и полных комплексов ледниковых образований в долинах современных рек. Конечные морены позднечетвертичных ледников на восточном побережье Камчатки располагаются у современного берега полуострова. В береговых обрывах хорошо прослеживается переход ледниковых отложений в морские отложения низких (12—20 м) морских террас (Власов и Чемяков, 1950а, 1950б).

Таким образом, имеющиеся материалы свидетельствуют о возможном покровном характере древнечетвертичного оледенения Парамушира. В позднечетвертичное время там развивались преимущественно долинныя ледники, в предгорьях местами сливавшиеся в небольшие ледниковые покровы. Оледенения Северных Курильских островов, видимо, были синхронны с оледенениями Камчатки.

Четвертичные оледенения Северных Курильских островов являются наиболее вероятной причиной обедненности их растительного мира. На покрытых льдами островах могли погибнуть многие произраставшие там растительные виды. Островное положение территории препятствовало в дальнейшем иммиграции на нее новых растительных видов.

Вулканизм если и имел значение при формировании биоценозов Курильских островов, то явно подчиненное. Геологические разрезы на островах убедительно показывают локальность и разновременность четвертичных извержений лав и пирокластического материала из различных вулканических очагов центрального типа. При этих условиях массовая гибель растительных и животных видов на крупных островах невозможна. Сохранившиеся во многих убежищах, растения и животные после извержений быстро размножались и восполняли потери в районах действовавших вулканов.

Главный практический вывод, который следует сделать из сказанного, тот, что нет причин сомневаться в возможности искусственного лесоразведения на Северных Курильских островах. Не современные климатические и почвенные условия, не вулканические процессы, продолжающиеся и теперь, а давно прошедшие явления обусловили безлесные ландшафты Парамушира, Шумшу, Онекотана. Уничтоженные ледниками леса могут быть возобновлены усилиями человека. Вокруг крупных населенных пунктов возможно создание лесных парковых насаждений.

Литература

Васильев В. Н. Краткий очерк растительности Курильских островов. Природа, 6, 1946. Власов Г. М., Ю. Ф. Чемяков. Основные этапы формирования рельефа полуострова Камчатки в четвертичный период и его геоморфологическое районирование. Изв. ВГО, т. 82, № 4, 1950а. Власов Г. М., Ю. Ф. Чемяков. Четвертичные оледенения Камчатки. Сб. «Вопросы географии Дальнего Востока», № 1, 1950б. Конаков Н. Н. К зоогеографии южной гряды Курильского архипелага. Изв. ВГО, т. 79, № 4, 1947. Корсунская Г. В. Геоморфология островов Курильского архипелага. Изв. ВГО, т. 79, № 4, 1947.

1958 . Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К И Й С Б О Р Н И К . X

Г Е О Г Р А Ф И Ч Е С К О Е О Б Щ Е С Т В О С О Ю З А С С Р

Б. Д. ХАРИТОНОВ

К МЕТОДИКЕ КЛАССИФИКАЦИИ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩ ПО УСЛОВИЯМ ПЕРЕРАБОТКИ

Создание крупных водохранилищ в долинах равнинных рек приводит к изменениям природных условий значительных областей. Одно из наиболее существенных изменений заключается в нарушении устойчивости береговых склонов в связи со значительным подъемом воды и появлением нового фактора формирования береговых склонов — абразионного размыва. Это приводит к выработке нового поперечного профиля береговых склонов, устойчивого в новых условиях. Переформирование береговых склонов водохранилищ получило название переработки берегов.

Наблюдения, приведенные на водохранилище Днепропетровской ГЭС, показывают, что величина переработки за время с 1935 по 1951 г. достигла в ряде мест ста метров (Пышкин, 1954). Величина так называемой «переработки в конечную стадию», согласно существующим прогнозам (Золотарев, 1955), должна достигать сотен метров.

Находящиеся в этой полосе крупные населенные пункты и промышленные предприятия потребуют специальных мер защиты их территорий, а сельские населенные пункты — переселения на участки, находящиеся вне угрожаемой зоны.

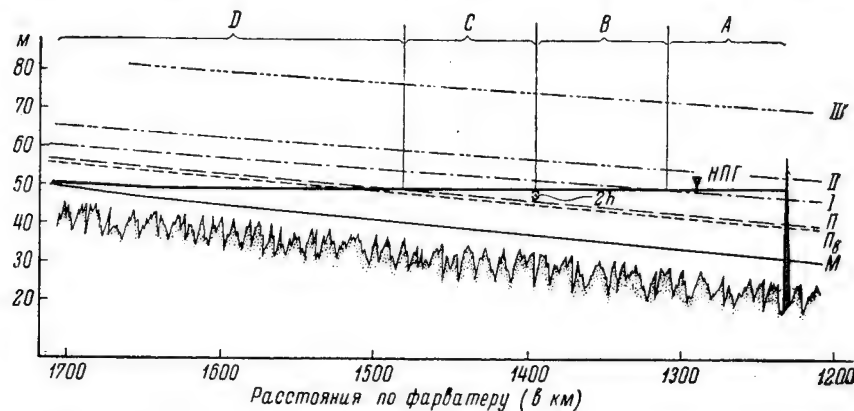
Существующие методы прогноза переработки берегов решают эту задачу как двумерную — в плоскости нормального к берегу профиля. Для пространственного решения этой задачи необходимо учитывать ряд явлений и в первую очередь — продольный транспорт продуктов разрушения берегов. Последнее явление в настоящее время еще совершенно не изучено, а потому не может быть охарактеризовано с количественной стороны даже приближенно.

Однако для первых стадий существования водохранилища, т. е. для первых 10—20 лет, продольный транспорт еще не играет значительной роли, так как продукты разрушения берегов еще только начинают образовываться. Таким образом, можно допустить, что для первых 10—20 лет прогноз переработки, сделанный в плоскости профиля, в достаточной степени отображает сущность самого процесса переработки. Для пространственного же представления о переработке необходимо распространить данные прогноза по профилю на весь участок берега, который этот профиль может характеризовать.

Величина переработки берега в основном определяется гидрологическими, геоморфологическими и геологическими факторами. Эти группы факторов проявляются во взаимосвязи и взаимодействии.

В последнее время С. Л. Вендровым (1955) предложено делить водохранилище по длине на ряд зон на основе гидрологических факторов, влияющих на переработку, в частности по отличиям уровенных режимов в этих зонах. Такое деление дает некоторое представление о различиях в условиях переработки берега в различных зонах, однако представления эти не полны, в частности при этом не учитывается защитная роль мелководий, образованных затопленными низкими террасами, в то время как роль эта несомненна (Золотарев, 1955).

Наиболее существенным моментом, в значительной степени определяющим величину переработки берегов в различных зонах водохранилища, является соотношение положения нормального подпорного горизонта (НПГ) водохранилища с геоморфологическими элементами долины реки, иначе говоря — взаимосвязь факторов гидрологических с геоморфологическими. Если, кроме того, еще учесть влияние геологических факторов,



Пример районирования берегов водохранилища по условиям переработки. М — меженный горизонт реки; Пв — горизонт паводковых вод реки; П — поверхность пойменной террасы; I, II и III — поверхности соответственно первой, второй и третьей надпойменных террас; НПГ — нормальный подпорный горизонт водохранилища; А, В, С и Д — зоны водохранилища, выделяемые по условиям переработки берегов.

то мы получим наиболее полное представление о влиянии на переработку всех групп факторов, обуславливающих ее.

Как известно, НПГ водохранилищ почти горизонтален, речная же долина, а следовательно и элементы ее (дно долины, образуемое поймой, и поверхности террас) имеют известный продольный уклон. В связи с этим в низовой части водохранилища имеет большие глубины и ширину; абразия здесь будет проявлена в большей степени, нежели в верховьях водохранилища, где последнее по своему уровенному режиму будет в значительной степени напоминать реку и где, следовательно, сохранит свое значение эрозионный разрыв. Некоторые из элементов долины, в частности пойма, а иногда также и надпойменные террасы, в низовой части водохранилища окажутся затопленными. При этом в средней зоне водохранилища они могут образовывать мелководья, а в верховой — оказаться выше НПГ и явиться поэтому предметом переработки.

Из сказанного следует, что соотношение положения НПГ и геоморфологии долины и должно быть положено в основу классификации берегов водохранилищ по условиям переработки, а уже на этом фоне должно быть проведено деление на участки, отличающиеся геологическим строением (литологией, мощностью горизонтов, характером залегания и т. п.).

Для выяснения роли соотношения НПГ с геоморфологическими элементами долины рассмотрим продольный профиль долины реки, на котором показаны уровни меженных и паводковых вод, поверхности речных террас и НПГ водохранилища (см. рисунок).

Как уже отмечалось, в предплотинной части водохранилища будет иметь наибольшие глубины и ширину, при этом могут оказаться затопленными низкие надпойменные террасы. Допустим, что первая надпойменная терраса с созданием водохранилища будет затоплена на некоторую глубину, при которой участки развития этой террасы будут представлять собой мелководья, ослабляющие волновое воздействие на берег, образуемый более высокими террасами.

Как известно, волны начинают испытывать сопротивление дна при глубине H , равной половине длины волны. Однако из теории волнового движения известно также, что скорость движения частиц воды на этой глубине составляет лишь 4% их скорости у поверхности.

Из этого можно заключить, что глубину, на которой волны начинают испытывать существенное сопротивление дна, следует принять меньшей половины длины волны. С другой стороны, очевидно, что эта глубина не может быть меньше высоты волны h , поскольку при такой глубине происходит полное разрушение волн.

Для наших целей можно принять глубину, при которой волны начинают испытывать значительное сопротивление дна, а следовательно, и значительно терять свою энергию, равной удвоенной высоте волны, т. е. когда $H = 2h$. Справедливость такого допущения, в частности, подтверждается тем, что, как показали натурные наблюдения, глубина бровки подводной отмели водохранилищ равна удвоенной высоте волны (при песчаных грунтах), из чего следует, что на большей глубине воздействие волн на дно незначительно.

Согласно сказанному, в выделенной нами приплотинной зоне A должно соблюдаться условие $H_1 \leq 2h$, где H_1 — глубина затопления первой надпойменной террасы. Пойменная терраса в этой зоне будет затоплена на глубину, значительно превосходящую двойную высоту волны, т. е. $H_n > 2h$.

Таким образом, в пределах зоны A ветровое волнение, возникшее в области, имеющей значительные глубины, будет гаситься на участках развития первой надпойменной террасы, благодаря чему на этих участках следует ожидать меньшую переработку по сравнению с участками, на которых первая надпойменная терраса уничтожена в результате эрозийного размыва.

Следующая зона B характеризуется тем, что пойма здесь еще продолжает быть затопленной на глубину, превосходящую двойную высоту волны, а в верхней части зоны равную этой величине, т. е. $H_n \geq 2h$. В то же время поверхность первой надпойменной террасы здесь уже появилась из-под воды, и терраса эта сама стала предметом переработки.

Несмотря на то что зона B находится выше предыдущей (по течению), переработка здесь может достигать больших величин, поскольку здесь отсутствует гаситель волновой энергии в виде готовой подводной отмели.

В пределах зоны C пойма будет затоплена на величину, меньшую двойной высоты волны, т. е. $H_n \leq 2h$. Благодаря этому пойма здесь будет играть ту же роль, что и первая надпойменная терраса в предплотинной зоне водохранилища, т. е. будет гасить волны. В результате этого перера-

ботка первой и более высоких террас здесь будет ослаблена по сравнению с переработкой в зоне *B*.

Зона *D* в нашем примере характеризуется тем, что НПГ здесь не будет превышать уровня средних паводков. В этом случае роль абразионного подмыва берегов будет весьма незначительной, так как ширина и глубина водохранилища здесь будет даже меньше, чем у незарегулированной реки в паводок. Поскольку же здесь сохраняются скорости течения, близкие к первоначальному, то эрозионный размыв здесь будет иметь то же значение, что и до создания водохранилища. На основании этого можно предположить, что переработка берегов, обусловленная абразионным размывом, в пределах зоны *D* практически будет отсутствовать.

В зависимости от конкретных условий того или иного водохранилища в пределах намеченных таким образом зон могут быть в свою очередь выделены участки, отличающиеся особенностями геологического строения, морфологией склонов и т. п., а также участки, на которых может сказаться сработка уровня воды в водохранилище.

При ином положении НПГ относительно геоморфологических элементов долины возникнут другие их соотношения, в результате чего деление водохранилища на зоны по условиям переработки берегов будет иным. Однако такая дифференциация берегов всегда может быть проведена на водохранилищах, создаваемых в долинах равнинных рек, если известны в общих чертах геоморфологическое строение долины и уровенные режимы реки и водохранилища.

Литература

Вендров С. Л. О динамике береговой зоны Цимлянского водохранилища. Известия АН СССР, сер. геогр., № 5, 1955. Золотарев Г. С. Инженерно-геологическое изучение береговых склонов водохранилищ и оценка их переработки. Труды Лабор. гидрогеолог. пробл. АН СССР, т. XII, 1955. Пышкин Б. А. Вопросы динамики берегов водохранилищ. АН УССР, 1954.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
От редакции	4
З. А. Сваричевская. Геоморфология Северного Казахстана	5
К. И. Геренчук. К вопросу о роли тектонического фактора в развитии орографии Русской равнины	32
В. В. Ламакин. Танхойский берег Байкала	72
А. Д. Колбутов. О составе, особенностях залегания и условиях образования лѣссовых пород на Русской равнине	108
И. Н. Сафронов. Террасы Кубани	122
В. Л. Виленкин. К вопросу о формировании современного рельефа при- брежной зоны северного Приазовья	133
В. С. Вышемирский и И. П. Варламов. Развитие рельефа западного Верхоянья и смежных частей Сибирской платформы	142
Н. П. Крайнер. Русские гляциалисты — предшественники П. А. Кропоткина	151
Н. Н. Соколов. О геоморфологической терминологии	160
А. П. Сигов. Раннечетвертичная переуглубленная Тоболо-Убаганская долина	165
В. И. Орлов. Некоторые данные об оврагах Западно-Сибирской низменности	169
И. Я. Ермилов. Оригинальные формы скульптурного микрорельефа на полуострове Мангышлак	172
И. А. Волков. Следы древнего Узбоя на шоре Келькор	175
А. И. Баранова. О новой находке <i>Cardium edule</i> L. в юго-восточном Прикаспии	180
Г. М. Власов. Четвертичные оледенения Северных Курильских островов . .	184
Б. Д. Харитонов. К методике классификации берегов водохранилищ по условиям переработки	189

ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ СБОРНИК

Выпуск X

*

Утверждено к печати

Географическим обществом СССР

*

Редактор издательства *Н. В. Цветков*

Технический редактор *Р. Е. Зендель*

Корректоры *Г. А. Баре* и *Л. А. Петрова*

*

Сдано в набор 13/II 1958 г. Подписано
к печати 12/VII 1958 г. РИСО АН СССР

№ 2—10В. Формат бумаги. $70 \times 108 \frac{1}{16}$.

Бум. л. $6 \frac{1}{8}$. Печ. л. $12 \frac{1}{4} = 16.78$ усл.

печ. л. + 3 вкл. Уч.-изд. л. 15.84 +

+ 3. вкл. (0,63). Изд. № 473.

Тип. зак. № 377. М-20844. Тираж 1600.

Цена 13 р. 05 к.

*

Ленинградское отделение Издательства Академии
наук СССР

Ленинград, В-164 Менделеевская лин., д. 1.

2-я тип. Трансжелдориздата МПС.